BETON
GUIDE PRATIQUE

ECOLE DE METIERS, Kaya, Burkina Faso

Concevoir et mettre en œuvre des bétons durables







Tables des matières



Introduction

A tous les stades de la mise en œuvre du béton interviennent des bonnes pratiques. Ces «trucs» issus de l'expérience quotidienne se transmettent de bouche à oreille. Le Guide Pratique les a consignés pour les rendre accessibles à tous. Cette brochure contient également les informations et directives générales que l'on trouve dans les manuels et les ouvrages de référence habituels.

Ce Guide Pratique s'adresse à tous ceux qui interviennent sur la conception, la fabrication et la mise en œuvre du béton, qu'il soit prêt à l'emploi ou préfabriqué. Les maîtres d'ouvrages et les prescripteurs trouveront également de l'intérêt à lire ces informations et recommandations.

D'une manière générale, on considère le béton comme un matériau inaltérable d'une durabilité exceptionnelle. Si l'on observe aujourd'hui çà et là quelques dégâts, la cause en est le plus souvent due à une conception erronée au stade du projet ou à la mise en œuvre de procédés mal adaptés.

Le Guide Pratique veut contribuer à éliminer ces « malfaçons ». En suivant ses conseils, on s'apercevra que, par des méthodes simples et en respectant les règles traditionnelles, on obtient un béton de qualité.

Les données spécifiques d'un projet peuvent cependant nécessiter des méthodes constructives particulièrement complexes. La réussite exige alors une qualification supérieure des exécutants et des contrôles plus poussés de la mise en œuvre et de la qualité.

Ecole de métiers, Kaya, Burkina Faso 2012





Les constituants du béton



Généralités

Le ciment est un liant hydraulique. On entend par là une substance qui, mélangée à l'eau dite de gâchage, est capable ensuite de durcir aussi bien à l'air que sous l'eau. La pâte de ciment durcie est pourvue d'une résistance mécanique élevée et elle ne se dissout plus dans l'eau.

Les ciments fabriqués en Europe répondent aux exigences des normes (Ciment, compositon, provenience, spécifications et critères de conformité).

Historique

Dans l'Antiquité déjà, les Romains utilisaient un mortier hydraulique composé d'une chaux siliceuse additionnée de pouzzolanes ou de brique pilée. Avec des granulats appropriés, ils obtenaient l'Opus Caementitium ou «ciment romain», précurseur de notre béton, et à l'origine du mot «ciment».

En 1824, l'Anglais J. Aspdin élabora et breveta un produit proche du ciment, obtenu par cuisson d'un mélange finement broyé de calcaire et d'argile. Ce liant permettait de confectionner un béton comparable à la pierre de Portland (calcaire très résistant de l'île de Portland) couramment utilisée dans la construction en Angleterre. D'où sa désignation de «Ciment Portland».



Vue générale d'une cimenterie

Le ciment



Fig 1.1.1
Engins à l'œuvre dans une carrière



Fig 1.1.2
Hall de préhomogénéisation du cru avant broyage



Fig 1.1.3
Le four rotatif, cœur de la cimenterie



Fig 1.1.4
Intérieur d'un four rotatif

Fabrication

La fabrication du ciment Portland consiste à préparer un mélange des matières premières de granulométrie définie, à le cuire jusqu'au seuil de fusion et à broyer le produit de cette cuisson en une poudre fine et réactive : le ciment. Globalement, on peut distinguer quatre étapes dans la fabrication du ciment :

Extraction et concassage des matières premières (fig. 1.1.1)

Pour produire une tonne de ciment, il faut compter une tonne et demie de matières premières – calcaire et marne ou argile – qui libéreront à la cuisson de l'eau et de l'anhydride carbonique.
Dans la carrière même, la matière première est concassée en morceaux de dimension maximale de 60 mm environ.

Mélange et réduction en farine de la matière première

Lors de l'étape suivante, les différentes matières premières sont mélangées dans des proportions correspondant à la composition chimique optimale (fig. 1.1.2). Dans un broyeur à boulets ou à meules, la matière est simultanément séchée et réduite en poudre fine. A la sortie, on obtient la farine brute qui va être homogénéisée pour garantir une composition uniforme.

Transformation par cuisson de la farine en clinker

Le processus de cuisson à une température d'environ 1450 °C est l'opération principale de la fabrication du ciment (fig 1.1.3 et 1.1.4).
A la sortie du four, la matière se présente sous forme de clinker incandescent qui sera rapidement refroidi à l'air (fig 1.1.6).
On utilise comme combustible du charbon, de l'huile lourde, du gaz naturel, parfois avec appoint de matières de récupération, par exemple des solvants, des huiles usées ou de vieux pneus.

NB : le processus de production présenté ici est de type «voie sèche ». Des variantes existent :

- dans la « voie semi-sèche » : la farine est transformée en granules par humidification sur des grandes soles tournantes. Ces granules sont ensuite préchauffées sur une grille mobile avant d'entrer dans le four rotatif.
- dans la « voie humide » : les matières premières sont broyées et mélangées avec de l'eau pour former une pâte liquide qui est homogénéisée dans des grands bassins. Cette pâte est ensuite introduite dans le four rotatif.
- dans la « voie semi-humide » : la pâte, préparée comme en voie humide, est partiellement déshydratée dans des filtres-presses et ensuite séchée et broyée avant d'être introduite dans le four.

Mouture du clinker avec le gypse et les ajouts

Pour obtenir le matériau réactif recherché, le clinker est broyé dans une unité de broyage appropriée (fig. 1.1.5), avec une petite quantité de gypse (régulateur de prise). Suivant le type de ciment, on ajoute au clinker, lors de la mouture, des composants minéraux (calcaire, laitier granulé de haut fourneau, cendres volantes). On obtient ainsi des ciments appelés ciments composés ou ciments de haut fourneau.



Fig 1.1.5
Intérieur d'un broyeur

Remarques:



Fig 1.1.6

Le clinker à sa sortie du four et du refroidisseur

Le ciment

Les types de ciments courants et leur composition selon les normes

La norme NBN EN classe les ciments en 5 catégories principales (CEM I à CEM V) et distingue 27 produits. Tous les types de ciment ne sont pas fabriqués et présents sur le marché belge.

Principaux types	Notation des 27 produits (types de ciment courant)		Composition (pourcentage en masse) [a]										
			Constituants principaux										Constituants secondaires
			Clinker K	Laitier de haut fourneau S	Fumée de silice D [c]	Pouzzolane naturelle P	Pouzzolane naturelle calcinée Q	Cendre volante siliceuse V	Cendre volante calcique W	Schiste calciné T	Calcaire L	Calcaire LL	
CEM I	Ciment Portland	CEM I	95-100	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5
CEM II	Ciment Portland au laitier	CEM II/A-S	80-94	6-20	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5
		CEM II/B-S	65-79	21-35	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5
	Ciment Portland à la fumée de silice	CEM II/A-D	90-94	-	6-10	-	-	-	-	-	-	-	0-5
	Ciment Portland à la pouzzolane	CEM II/A-P	80-94	-	-	6-20	-	-	-	-	-	-	0-5
		CEM II/B-P	65-79	-	-	21-35	-	-	-	-	-	-	0-5
		CEM II/A-Q	80-94	-	-	-	6-20	-	-	-	-	-	0-5
		CEM II/B-Q	65-79	-	-	-	21-35	-	-	-	-	-	0-5
	Ciment Portland aux cendres volantes	CEM II/A-V	80-94	-	-	-	-	6-20	-	-	-	-	0-5
		CEM II/B-V	65-79	-	-	-	-	21-35	-	-	-	-	0-5
		CEM II/A-W	80-94	-	-	-	-	-	6-20	-	-	-	0-5
		CEM II/B-W	65-79	-	-	-	-	-	21-35	-	-	-	0-5
	Ciment Portland au schiste calciné	CEM II/A-T	80-94	-	-	-	-	-	-	6-20	-	-	0-5
		CEM II/B-T	65-79	-	-	-	-	-	-	21-35	-	-	0-5
	Ciment Portland au calcaire	CEM II/A-L	80-94	-	-	-	-	-	-	-	6-20	-	0-5
		CEM II/B-L	65-79	-	-	-	-	-	-	-	21-35	-	0-5
		CEM II/A-LL	80-94	-	-	-	-	-	-	-	-	6-20	0-5
		CEM II/B-LL	65-79	-	-	-	-	-	-	-	-	21-35	0-5
	Ciment Portland composé [b]	CEM II/A-M	80-94	← 6-20 →									0-5
		CEM II/B-M	65-79	← 21-35 →									0-5
CEM III	Ciment de haut-fourneau	CEM III/A	35-64	36-65	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5
		CEM III/B	20-34	66-80	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5
		CEM III/C	5-19	81-95	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5
CEM IV	Ciment pouzzolanique [b]	CEM IV/A	65-89	-	← 11-35 →					-	-	-	0-5
		CEM IV/B	45-64	-	← 36-55 →					-	-	-	0-5
CEM V	Ciment composé [b]	CEM V/A	40-64	18-30	-	18-30			-	-	-	-	0-5
		CEM V/B	20-38	31-50	-	31-50			-	-	-	-	0-5

a) Les valeurs indiquées se réfèrent à la somme des constituants principaux et secondaires, à l'exclusion des sulfates de calcium (gypse et anhydrite), utilisés pour réguler la prise du ciment.
b) Dans le cas des ciments portland composés CEM II/A-M et CEM II/B-M, des ciments pouzzolaniques CEM IV/A et CEM IV/B et des ciments composés CEM V/A et CEM V/B, les constituants principaux, autres que le clinker, doivent être déclarés dans la désignation du ciment.
c) La proportion de fumée de silice est limitée à 10%

Tableau 1.1.1. Composition des ciments selon NBN EN

Les classes de résistance

Les ciments sont répertoriés en trois classes de résistance désignées par les valeurs 32,5, 42,5 et 52,5 (tableau 1.1.2). Ces trois classes sont complétées par trois sous-classes selon leur résistance au jeune âge :

- montée en résistance normale (classe de résistance accompagnée de la lettre « N »)
- montée en résistance rapide (classe de résistance accompagnée de la lettre « R »)
- montée en résistance lente (classe de résistance accompagnée de la lettre « L »), sous-classe réservée aux ciments de type CEM III.

Classe de résistance	Résistance à la compression 1) [N/mm²]			
	Résistance à court terme		Résistance courante	
	2 jours	7 jours	28 jours	
32,5 L 2)	-	≥ 12	≥ 32,5	≤ 52,5
32,5 N	-	≥ 16		
32,5 R	≥ 10	-		
42,5 L 2)	-	≥ 16	≥ 42,5	≤ 62,5
42,5 N	≥ 10	-		
42,5 R	≥ 20	-		
52,5 L 2)	≥ 10	-	≥ 52,5	---
52,5 N	≥ 20	-		
52,5 R	≥ 30	-		

1) Déterminée selon la méthode NBN EN 196-1
2) Sous-classe réservée aux ciments de type CEM III NBN EN 197-4

Tableau 1.1.2.
Classes de résistance des ciments selon les normes NBN EN

Caractéristiques complémentaires

Certains ciments (pays dfivers) ont des caractéristiques complémentaires, non couvertes par la norme européenne. Ces caractéristiques complémentaires sont reprises ci-après :

Ciments à haute résistance aux sulfates (HSR) selon la norme.

Les ciments « High Sulphate Resisting » (HSR) sont utilisés pour la réalisation de bétons soumis à des environnements particulièrement agressifs vis-à-vis des sulfates, comme par exemple des sols contenant plus de 3000 mg/kg de sulfates ou des liquides contenant plus de 500 mg/l de sulfates.
Pour les CEM I, la caractéristique complémentaire HSR est accordée en fonction des caractéristiques chimiques du ciment (notamment la teneur en alumine, Al_2O_3 et en aluminate tricalcique, C_3A).
En raison de leur composition (forte teneur en laitier granulé de haut fourneau), tous les ciments de type CEM III/B et CEM III/C bénéficient de la caractéristique complémentaire HSR.
Les CEM V/A (S-V) peuvent également bénéficier de la caractéristique HSR, en fonction de leur composition chimique.

Ciments à teneur limitée en alcalis (LA) selon la norme

Les ciments « Low Alkali » (LA) sont utilisés pour la réalisation de bétons soumis au risque de réaction alcali-silice, c'est à dire lorsque les deux conditions suivantes sont remplies :

- environnement humide
- présence dans le béton de granulats sensibles aux alcalis ou dont la sensibilité est inconnue.

La caractéristique complémentaire LA peut être accordée aux ciments CEM I, CEM III/A, B ou C et CEM V en fonction de la teneur totale en Na2O équivalent.

Ciments à haute résistance initiale (HES) selon la norme.

Les ciments CEM I «High Early Strength» (HES) satisfont à des critères additionnels de résistances minimales à 1j et permettent donc des décoffrages ou une mise en service très rapide:

- CEM I 42.5 R HES => Rc 1 jour ≥ 10 MPa
- CEM I 52.5 N HES => Rc 1 jour ≥ 15 MPa
- CEM I 52.5 R HES => Rc 1 jour ≥ 20 MPa

Ciment sursulfaté selon la norme (ciment spécial).

Le constituant principal du ciment sursulfaté est le laitier granulé de haut fourneau (S) : teneur supérieure à 80%. Les deux autres composants sont le sulfate de calcium et le système d'activation.
La classe de résistance, définie via un ratio spécifique E/C de 0.4 sur mortier, peut être 30, 40 ou 50 MPa.
La désignation normalisée du ciment sursulfaté est CSS.
Etant donné leur teneur élevée en laitier, ces ciments ont la caractéristique complémentaire HSR et d'habitude, ils sont aussi LA.

Le ciment

Ciment à faible chaleur d'hydratation

La norme NBN EN désigne les ciments à faible chaleur d'hydratation par les lettres LH. Un ciment LH est un ciment dont la chaleur d'hydratation ne doit pas dépasser 270 J/g, déterminée selon la NBN EN après 7 jours ou après 41h.

Cette caractéristique permet de limiter l'élévation de température dans le béton, due à l'hydratation du ciment. Elle est principalement appréciée lors des bétonnages de masse où la dissipation de chaleur vers l'extérieur est très lente.

Exemples de désignations normalisées

CEM Ciment	**I** Ciment de type I (Ciment Portland)	**52,5** Classe de résistance 52,5	**R** Montée en résistance rapide	**CE** Conforme à la EN 197-1	**HES** Haute résistance initiale	**BENOR** Conforme à la NBN EN 197-1 et à la norme NBN B 12-110			
CEM Ciment	**II** Ciment de type II (Ciment Portland avec ajout)	**B** Taux d'ajout compris entre 21 et 35 %	**M** Mélange d'ajout	**LL-S-V** Les ajouts sont du calcaire, du laitier et des cendres volantes	**32,5** Classe de résistance 32,5	**R** Montée en résistance rapide	**CE** Conforme à la EN 197-1	**BENOR** Conforme à la NBN EN 197-1	
CEM Ciment	**III** Ciment de type III (Ciment de haut fourneau)	**B** Taux d'ajout compris entre 66 et 80 %	**42,5** Classe de résistance 42,5	**N** Montée en résistance normale	**LH** Faible chaleur hydratation	**CE** Conforme à la EN 197-1	**HSR** Ciment à haute résistance aux sulfates	**LA** Ciment à faible teneur en alcalis	**BENOR** Conforme à la NBN EN 197-1 et aux normes NBN B12-109 et NBN B12-108

Caractéristiques des principaux types d'ajouts au clinker

Comme spécifié dans le tableau 1.1.1, les constituants principaux du ciment sont, outre le clinker, les ajouts, cobroyés ou mélangés avec le clinker et qui donnent au béton des propriétés particulières, par exemple, en matière d'ouvrabilité du béton frais, de compacité, de réduction de chaleur d'hydratation ou de durabilité.

Classification

Type d'ajout	Réaction Chimique	Effet ↑= Augmentation ↓ = Diminution	Ajouts
Inerte	Aucune réaction, ou tout au plus réactions superficielles	↑ Ouvrabilité ↓ Porosité (effet de remplissage)	Additions calcaires Additions silicieuses
Pouzzolanique	Réaction avec l'hydroxyde de calcium et l'eau : formation de substances analogues aux hydrates du ciment	↑ Ouvrabilité ↓ Porosité ↑ Durabilité ↓ Chaleur d'hydratation ↓ Résistance initiale ↑ Résistance finale	Cendres volantes silicieuses Fumée de silice Pouzzolanes naturelles
Hydraulicité latente	En présence d'activateurs (alcalins, chaux, sulfates) et d'eau : formation de substances analogues aux hydrates de ciment	↓ Porosité ↑ Durabilité ↓ Chaleur d'hydratation ↓ Résistance initiale ↑ Résistance finale	Laitier granulé de haut fourneau (séché et broyé)

Tableau 1.1.3. Classification et effet des ajouts





Fig 1.1.9.

Laitier granulé de haut fourneau

Ajouts inertes

Calcaire (L,LL)

La fine poudre de calcaire agit comme un «lubrifiant» et améliore l'ouvrabilité des bétons, notamment lorsque ce dernier doit être pompé. L'ajout de filler calcaire donne au ciment une bonne capacité de rétention d'eau, ce qui réduit les risques de ségrégation et favorise le compactage du béton et donc sa durabilité.

Ajouts pouzzolaniques

Les ajouts pouzzolaniques peuvent être naturels comme les pouzzolanes, ou artificiels comme les cendres volantes et la fumée de silice.

Dans une première phase de l'hydratation, ces ajouts sont inactifs et retardent plus ou moins la montée en résistance du béton. Dans une deuxième phase, ils réagissent lentement avec l'hydroxyde de calcium pour former des composés insolubles, analogues aux hydrates de ciment. Par cet effet pouzzolanique, ces ajouts contribuent ainsi à élever la compacité et la résistance finale de la pâte de ciment, mais ils nécessitent en conséquence un allongement de la durée de cure.

Cendres Volantes (V)

Les cendres volantes proviennent de la combustion du charbon pulvérisé dans les chaudières des centrales thermoélectriques. Leur qualité dépend non seulement du charbon utilisé (houille ou lignite), mais aussi du type de centrale et de son mode d'exploitation. Ces raisons expliquent que la qualité des cendres volantes puisse largement fluctuer d'un producteur à l'autre.

Les cendres volantes sont constituées de particules dont la finesse proche du ciment et la forme sphérique contribuent à améliorer l'ouvrabilité du béton frais. L'ajout de cendres volantes dans le ciment confère également aux bétons une meilleure durabilité. Le léger retard de durcissement qu'elles induisent diffère également le développement de la chaleur d'hydratation et atténue en conséquence les pointes de température lors de bétonnages de masse.

L'usage d'adjuvants entraîneur d'air est déconseillé avec les cendres volantes. Le carbone contenu dans celles-ci perturbe en effet le fonctionnement de ces adjuvants.

Ajouts à hydraulicité latente

En présence d'eau et en milieu alcalin suite à la libération de la chaux lors de l'hydratation du clinker, les ajouts à hydraulicité latente réagissent en formant des composés semblables aux hydrates de clinker, en durcissant de manière plus lente que le ciment type CEM I.

Laitier de haut fourneau (S)

Le laitier granulé de haut fourneau est un sous-produit de l'industrie sidérurgique. Sa préparation nécessite des installations spécifiques et coûteuses (granulateur).

En cimenterie, le laitier granulé est séché puis cobroyé ou mélangé avec le clinker dans une proportion qui varie de 6 à 95 % pour donner des ciments Portland au laitier (CEM II, jusqu'à 35 % de laitier) et des ciments de haut fourneau (CEM III, jusqu'à 95% de laitier).

Les ciments contenant du laitier ont une montée en résistance d'autant plus lente que leur teneur en laitier est élevée. Ils demandent généralement un allongement du temps de coffrage et une durée de cure plus importante.

Ils ont néanmoins des qualités qui les rendent intéressants dans plusieurs domaines d'applications :

- Chaleur d'hydratation réduite, utile pour les bétonnages de masse et les bétonnages par temps chaud.
- Structure compacte de la pâte de ciment conférant au béton une bonne résistance aux eaux douces, à l'eau de mer, aux eaux sulfatées et à la pénétration des ions chlores.
- Diminution du risque d'efflorescences (pour des teneurs élevées en laitier).
- Bon maintien d'ouvrabilité.
- Résistance mécanique très élevée à longue échéance.
- Réduit les risques de réactions alcalis-granulats.
- Teinte claire.

Le ciment

Hydratation du ciment

Mélangé à l'eau, le ciment réagit en s'hydratant. Cette réaction dégage une certaine quantité de chaleur et entraîne le durcissement progressif de la pâte. (fig 1.1.10)

L'hydratation engendre essentiellement deux produits principaux (fig 1.1.11) :

- Des aiguilles (silicates de chaux hydratés ou CSH) qui croissent lentement et s'enchevêtrent pour donner un réseau dense et résistant (1).
- Des plaquettes d'hydroxyde de calcium (ou chaux hydratée, $Ca[OH]_2$) fortement alcalines et sans effet sur la résistance, mais jouant un rôle dans la protection des armatures contre la corrosion (2).

Fig 1.1.10

Comparaison de l'échauffement de mortiers fabriqués avec un CEM I 52,5 R et un CEM III/C 32,5 N

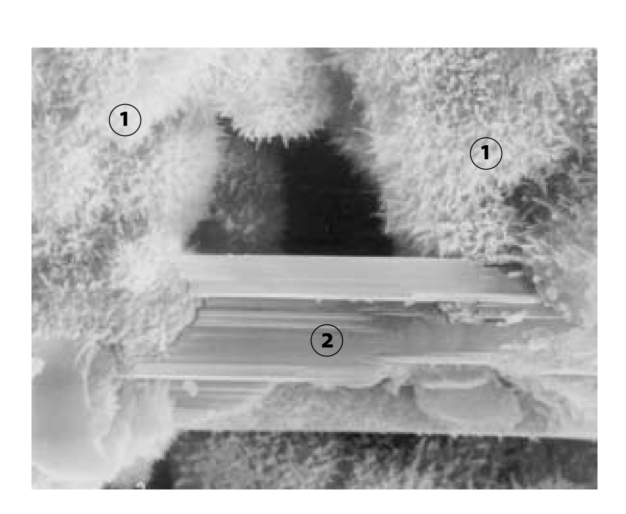


Fig 1.1.11.

Pâte de ciment hydraté observée au microscope électronique à balayage

Stockage et conservation du ciment

Stocké longtemps et sans protection, le ciment absorbe l'humidité de l'air. Il peut se former des grumeaux et le processus de durcissement risque de s'en trouver altéré. Tant que les grumeaux s'écrasent facilement entre les doigts, la perte de résistance est négligeable.

Le ciment en sacs a une durée de conservation limitée. Il est nécessaire de conserver les sacs au sec dans un entrepôt.

Densité du ciment en vrac :	
Non tassé	900-1250 kg/m^3 (selon le type de ciment)
Tassé	jusqu'à 2200 kg/m^3 (selon le type de ciment, ainsi que la durée et les conditions de stockage)

Consigne de sécurité

Le ciment est un liant hydraulique. Au contact de l'eau ou de l'humidité, il y a réaction alcaline. Par conséquent, le ciment peut provoquer des brûlures, rougeurs ou allergies en cas de contact prolongé avec la peau ou de projection dans les yeux. Il est donc indispensable de porter des équipements de protection pour la mise en œuvre des produits à base de ciment : lunettes, combinaison, gants, bottes, ... En cas d'irritation, rincer à l'eau abondamment et consulter un médecin.
Il est nécessaire de consulter la fiche de sécurité disponible sur demande avant toute utilisation.



Fig 1.1.12

Gamme sacs

Le ciment et la directive européenne sur le chrome VI

La directive européenne 2003/53/CE, transcrite en droit belge par arrêté royal, impose à tous que « le ciment et les préparations contenant du ciment ne peuvent être utilisés ou mis sur le marché s'ils contiennent, lorsqu'ils sont hydratés, plus de 0,0002% (2ppm) de chrome VI soluble du poids sec total du ciment ».

Le chrome VI est naturellement présent en quantité infinitésimale dans les matières premières extraites en carrières qui sont utilisées pour la production du ciment.

En fonction de cette donnée de départ, Holcim ajoute au ciment un agent réducteur qui permet de garantir une teneur en chrome VI inférieure à la limite supérieure. La période d'efficacité de l'agent réducteur est mentionnée sur chaque bordereau de livraison ou sur chaque sac. Ce délai est valable dans des conditions de stockage appropriées : le ciment doit être stocké dans un silo ou en sac, à l'abri de l'humidité, et ne doit pas subir une aération excessive (s'abstenir d'une utilisation intensive de systèmes de fluidification à air comprimé dans les silos).

Il est à rappeler que la plupart des dermatoses sont liées à une irritation de la peau due au caractère alcalin de la pâte de ciment. Elles peuvent apparaître si les consignes de port d'équipements de protection individuelle ne sont pas respectées. La réduction de la teneur en chrome VI soluble des ciments ne doit en aucun cas dispenser les utilisateurs de l'usage des gants doublés de coton, de chaussures imperméables, de genouillères, de lunettes,...

L'eau de gâchage

Généralités

L'eau joue un double rôle dans la technologie du béton. D'une part, elle permet l'hydratation du ciment et d'autre part, elle est indispensable pour assurer l'ouvrabilité et un bon compactage du béton.

On entend par «eau totale», la totalité de l'eau contenue dans le béton frais.
L'« eau efficace » quant à elle comprend seulement:
- l'eau de gâchage, ajoutée au mélange
- l'eau contenue à la surface des granulats
- suivant les cas, l'eau apportée par les adjuvants ou les ajouts (suspensions de fumée de silice, de pigments ...)

L'eau totale comprend donc l'eau efficace plus l'eau contenue dans les granulats (eau d'absorption), qui n'est pas disponible pour mouiller le mélange et ainsi participer à son ouvrabilité et à l'hydratation du ciment. Pour cette raison, c'est la valeur de l'eau efficace qui est utilisée pour le calcul du facteur eau/ciment (E/C).



Fig 1.2.1
Bassins de décantation d'eaux de lavage d'une centrale à béton

Exigences concernant l'eau de gâchage

L'eau courante peut être utilisée pour le gâchage, pour autant qu'elle ne contienne pas en quantités appréciables des substances susceptibles de réagir avec le béton. Ces substances peuvent induire en particulier :
- une accélération ou un ralentissement de la prise et du durcissement (p. ex : sucre, acides humiques)
- un entraînement excessif d'air non contrôlé, d'où perte de résistance (p. ex : micro-organismes, huiles, graisses, suspensions, certains sels minéraux)
- la corrosion des armatures

> La norme NBN EN de juillet 2003 admet comme principe que l'eau potable peut être utilisée sans contrôle particulier pour la confection du béton.

L'eau destinée au gâchage doit être claire, incolore et inodore. Après agitation, il ne doit pas se former de mousse persistante. L'aptitude à l'emploi de l'eau pour la production de béton dépend de son origine (cf. norme NBN EN).

La teneur en sulfate ne doit pas dépasser 2000 mg/l.

La teneur en chlorures ne doit pas dépasser :
- pour le béton armé : 1000 mg/l,
- pour le béton non armé : 4500 mg/l,
- pour le béton précontraint : 500 mg/l.

La teneur en sels alcalins doit rester faible dans les bétons et les mortiers. Les impuretés organiques doivent être négligeables.

De nombreuses substances agressives sont moins redoutables dans l'eau de gâchage que dans l'eau qui entrera plus tard en contact avec le béton. Les eaux sulfatées ou riches en acide carbonique, entre autres, peuvent attaquer ou détruire le béton de l'extérieur. Elles sont cependant utilisables comme eau de gâchage, dans les limites de leur conformité à la NBN EN 1008.

Eau recyclée (eaux de lavage)

L'eau provenant des installations de recyclage des centrales à béton (fig. 1.2.1) est utilisable pour le gâchage, mais doit faire l'objet de contrôles réguliers, conformément à la norme NBN EN 1008 (A.2.1), tout spécialement s'il s'agit de bétons à performances élevées.

Les effets possibles de l'utilisation d'eaux de lavage doivent être pris en compte s'il s'agit d'un béton devant répondre à des caractéristiques particulières comme le béton apparent, le béton précontraint, le béton à air entraîné, le béton autoplaçant, ...

Les granulats

Généralités

On désigne en général par granulats l'ensemble des matériaux inertes-naturels ou artificiels-qui sont solidarisés par le ciment. Ce mélange qui se compose de diverses classes granulaires, constitue le squelette granulaire du béton et doit comporter le moins de vides possibles. Par rapport à la pâte de ciment qui les enrobe, des granulats de bonne qualité offrent les avantages suivants :

- résistance en général plus élevée
- meilleure durabilité
- stabilité volumique en présence d'humidité, d'où un effet favorable sur le retrait du béton (réduction)
- absorption d'une partie de la chaleur d'hydratation, d'où un effet régulateur sur le processus de prise.

Comme l'illustre la figure 1.3.1, on fait la distinction entre trois sortes de granulats : le sable (naturel ou concassé), le gravillon (en fait souvent dénommé gravier ou gravillon, selon qu'il est naturel ou concassé) et la grave (plus couramment désignée par le terme « mélange de gravillons et sables »).

Désignation	Définition	Exemples
Sable (naturel ou concassé)	D ≤ 4 mm et d = 0	0/1 0/2 0/4
Gravillon (gravier ou gravillon)	D ≥ 4 mm d ≥ 2 mm	2/8 8/16 16/32 4/32
Grave (mélange de gravillons et sables)	D ≤ 45 mm et d = 0	0/32

Fig 1.3.1
Définition avec exemples des termes « sable », « gravillon » et « grave »

Le terme filler est également couramment utilisé. Il désigne un granulat dont la plupart des grains passent au tamis de 63 μm et qui peut être ajouté aux matériaux de construction pour leur conférer certaines propriétés.

Caractéristiques

Les exigences concernant les caractéristiques des granulats pour béton sont spécifiées dans la NBN EN 12620 « Granulats pour béton » et le PTV 411 « Codification des granulats ».

Les caractéristiques principales des granulats pour béton sont les suivantes :

- caractéristiques géométriques (granularité, teneur en fines, forme)
- caractéristiques physiques (Los Angeles, Micro Deval, masse volumique et absorption d'eau, gélivité, réaction alcali-silice , résistance au polissage)
- caractéristiques chimiques (chlorure, sulfates solubles, soufre)
- propreté.

Les granulats

Caractéristiques géométriques

Granularité ou courbe granulométrique

La granularité influence de manière déterminante la porosité du squelette granulaire, et par conséquent la densité du béton et sa résistance. Elle a également une influence considérable sur la demande en eau et sur l'ouvrabilité du béton.

La granularité représente la distribution dimensionnelle des grains, exprimée en pourcentage de masse passant au travers d'un ensemble spécifié de tamis. En tamisant le granulat au moyen d'une série de tamis normalisés à mailles carrées, on obtient pour chaque tamis un refus qui permet de désigner les granulats en termes de dimension inférieure (d) et supérieure (D) de tamis, exprimé en d/D. Comme les classes granulaires d'un granulat présentent généralement plus ou moins toutes la même masse volumique, il est suffisant de spécifier la granularité en pourcentage de masse (voir fig 1.3.2, page suivante, exemples de courbes granulométriques).
Les tamis qui délimitent les classes granulaires (série de base et séries complémentaires) sont indiqués à la figure 1.3.3.

Série de base mm	Série de base + série 1 mm	Série de base + série 2 mm
0	0	0
1	1	1
2	2	2
4	4	4
-	5,6 (5)	-
-	-	6,3 (6)
8	8	8
-	-	10
-	11,2 (11)	-
-	-	12,5 (12)
-	-	14
16	16	16
-	-	20
-	22,4 (22)	-
31,5 (32)	31,5 (32)	31,5 (32)
-	-	40
-	45	-
63	63	63

Fig 1.3.3
Dimensions des tamis pour la spécification des classes granulaires

D'une manière générale les granulats sont livrés et utilisés en classes granulaires bien définies (fig. 1.3.4).

Exemples de classes granulaires	Désignation selon NBN EN 12620
≤ 0,063 mm	**Fines (filler)**
Classes granulaires	
0 – 4 mm	Sable
4 – 8 mm	Gravier } Gravillon
8 – 16 mm	Gravier } Gravillon
16 – 32 mm	Gravier } Gravillon
≥ 32 mm	Gravier grossier

Fig 1.3.4
Classes granulaires usuelles

Lorsqu'une classe granulaire fait partiellement ou totalement défaut dans un mélange, on parle de granularité « discontinue ». A l'endroit de la classe manquante, la granularité (courbe granulométrique) est caractérisée par un palier horizontal ou légèrement incliné (fig. 1.3.5). En général, on cherche à avoir une courbe continue, ce qui est favorable à une bonne ouvrabilité des bétons.

Influence de la teneur en fines

La fraction 0-4 mm a une influence primordiale sur la qualité d'ensemble du mélange de granulats. C'est sa porosité et la forme de sa granularité qui va jouer un grand rôle sur la demande en eau.
Un bon sable à béton doit avoir environ un tiers de ses grains compris entre 0,250 et 0,500 mm.
Les fines (< 0,125 mm) jouent aussi un rôle déterminant.
Pour cette raison, il peut être nécessaire de recomposer la fraction 0-4 mm à partir de sable naturel lavé, de sable concassé sec et/ou de sable concassé lavé.
L'expérience a montré que la teneur totale en fines (ciment, additions et part des granulats de dimensions ≤ 0,125 mm) doit se situer dans les limites fixées au tableau 1.3.6.

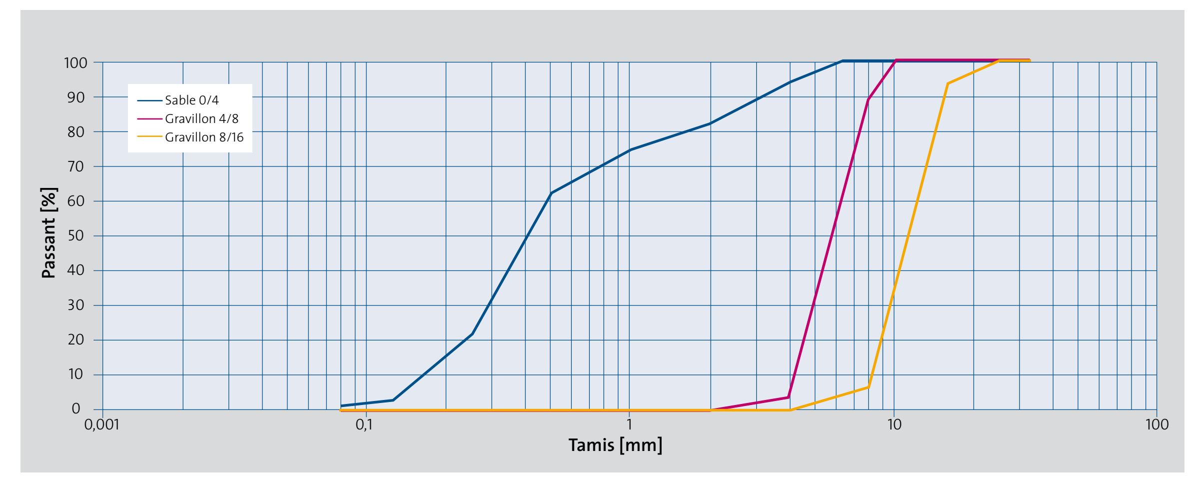


Fig 1.3.2
Exemple de courbes granulométriques de sable et gravillons

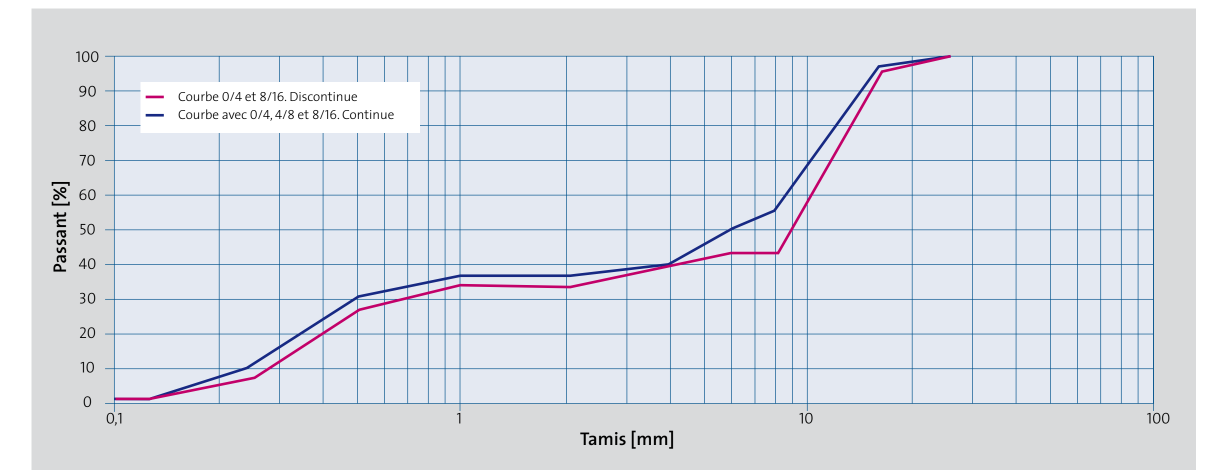


Fig 1.3.5
Courbe granulométrique d'un béton formulé avec (courbe continue) et sans (courbe discontinue) fraction intermédiaire 4/8

Une teneur optimale en fines

- Accroît la quantité de film lubrifiant sans augmentation notable de la quantité d'eau de gâchage
- Garantit une meilleure ouvrabilité du béton
- Améliore la capacité de rétention d'eau du mélange et prévient le ressuage pendant et après la mise en place
- Empêche la ségrégation lors de la mise en place et facilite le compactage du béton
- Améliore la compacité de la pâte de ciment et, par conséquent, l'étanchéité du béton
- Améliore l'efficacité des adjuvants

Il faut cependant veiller à ce que les fines ne comportent pas de substances argileuses de nature gonflante.

Les granulats

Diamètre maximal des granulats (mm)	8	16	22,5	32	45	63
Teneur en fines (kg/m^3 de béton)	450	400	375	350	325	300

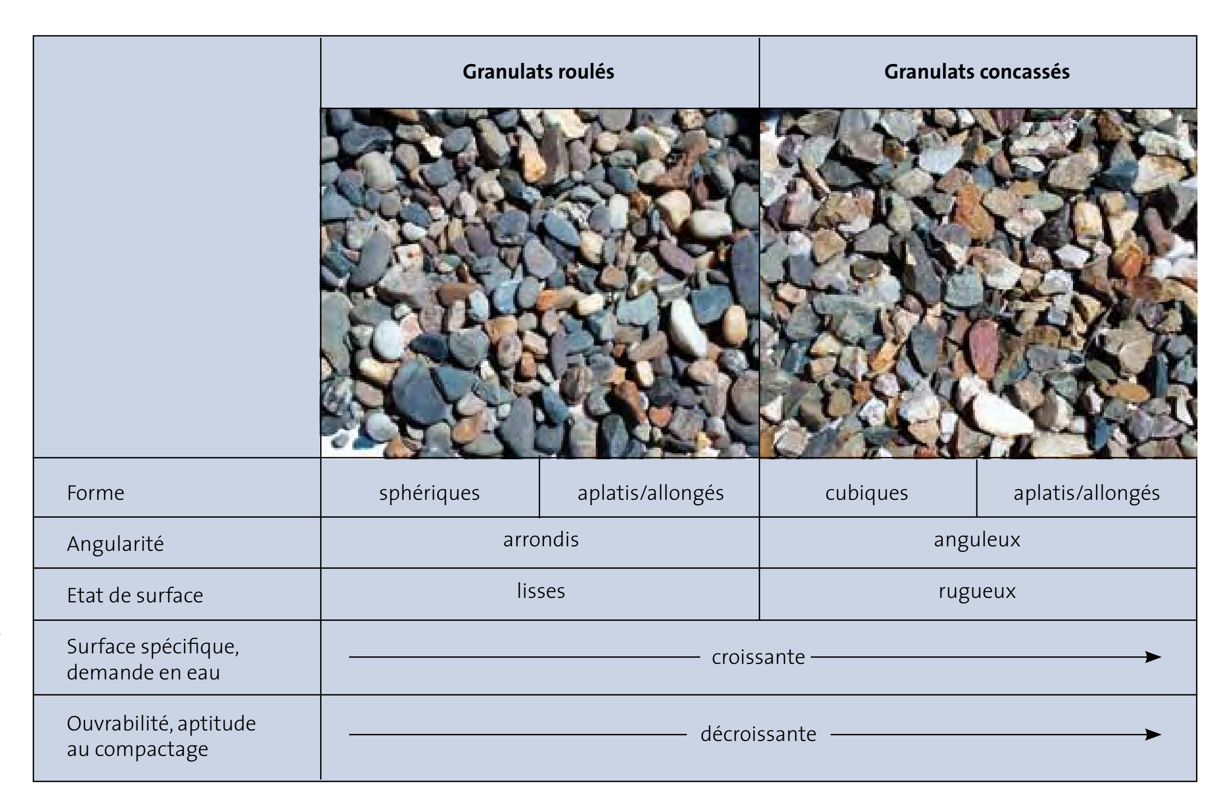
Tableau 1.3.6

Teneur en fines recommandées (ciment, additions et granulats ≤ 0,125 mm) en fonction de la dimension maximale des granulats ; le cas échéant, ces valeurs doivent être modifiées pour le béton pompé et le béton apparent.

Forme

La porosité et la forme des grains, mais aussi leur état de surface et leur distribution dimensionnelle influencent considérablement le besoin en eau du mortier d'enrobage, ainsi que l'ouvrabilité et la stabilité (ressuage) du béton. (voir figure 1.3.7)

L'expérience a montré qu'un mélange pour béton comprenant exclusivement des classes granulaires de granulats concassés pouvait très bien être utilisé. Les granulats concassés améliorent la résistance mécanique du béton (traction, compression, abrasion), mais influencent défavorablement l'ouvrabilité. La limitation des gravières exploitables entraîne un épuisement progressif des gisements de sables et de graviers naturels roulés, raison pour laquelle le recours aux granulats concassés et recyclés sera de plus en plus fréquent à l'avenir. Ceci ne pose aucun problème, pour autant que le volume de pâte de ciment soit adapté en conséquence.



	Granulats roulés		Granulats concassés	
Forme	sphériques	aplatis/allongés	cubiques	aplatis/allongés
Angularité	arrondis		anguleux	
Etat de surface	lisses		rugueux	
Surface spécifique, demande en eau	croissante →			
Ouvrabilité, aptitude au compactage	décroissante →			

Tableau 1.3.7

Relation entre la forme des grains et leurs propriétés

Caractéristiques physiques

Masse volumique et absorption d'eau

L'origine minéralogique et la porosité des granulats déterminent leur masse volumique nécessaire au calcul des matériaux (fig 1.3.8). La densité apparente correspond à la masse de matériau en vrac par unité de volume. Le taux d'humidité des granulats comprend l'eau à la surface des grains et celle absorbée par ceux-ci. L'humidité des sables est généralement comprise entre 4 et 8% de la masse, tandis que celle des granulats plus grossiers n'excède pas 3%.

Le taux d'humidité des granulats doit être pris en compte pour le calcul des volumes de granulats et pour celui de l'eau de gâchage.

L'eau absorbée par les granulats n'est pas disponible pour l'hydratation et la fluidité du béton.
L'eau absorbée par les gravillons peut être néfaste pour la résistance au gel.

La corrélation entre le taux d'humidité des granulats, spécialement du sable, et la densité apparente est illustrée à la fig. 1.3.9.

Granulats	Masse volumique (kg/m³)	Nature des granulats	Utilisation
Granulats courants	2650 – 2800	Dépôts fluviaux, granulats concassés	Béton armé et non armé, produits en ciment
Granulats lourds	≥ 3000	Barytine, minerai de fer, hématite, granulats en acier	Béton de protection contre les radiations
Granulats légers	≤ 2000	Argile, schiste ou verre expansé, pierre ponce	Béton léger, béton isolant, béton de pente
Granulats durs	≥ 2500	Quartz, corindon, carbure de silicium	Revêtements durs, béton résistant à l'abrasion

Fig 1.3.8
Classification des granulats en fonction de leur masse volumique

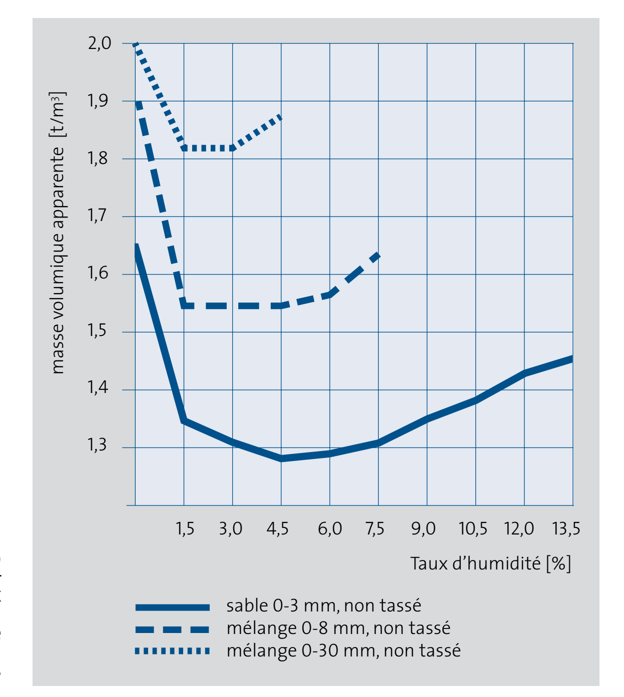


Fig 1.3.9
Corrélation typique entre le taux d'humidité et la masse volumique apparente en vrac de quelques classes granulaires

Les granulats

Los Angeles

Le coefficient Los Angeles détermine la résistance à la fragmentation d'un gravillon. Un faible coefficient LA signifie une bonne résistance à la fragmentation.

Gélivité

Lorsque le béton doit résister au gel, il convient de s'assurer de la résistance au gel-dégel des gravillons. Un gravillon ayant une absorption d'eau < 1% et/ou un LA<25 sera considéré comme non gélif (sans essais complémentaires nécéssaires). Certains granulats peuvent avoir un coefficient d'absorption d'eau > 2% et offrir une résistance au gel - dégel adéquate.
L'essai de gélivité des granulats consiste à faire subir des cycles de gel-dégel aux granulats saturés en eau et de mesurer la perte de masse en fin d'essai.

Réaction alcali-silice

La réaction alcali-silice est traitée au chapitre 3.8.

Autres caractéristiques éventuelles

Pour certaines applications (ex : béton pour revêtement routier), il est parfois nécessaire de poser certaines caractéristiques supplémentaires : résistance à l'usure (via l'essai micro-Deval MDE), résistance au polissage (via l'essai PSV anciennement CPA).

Caractéristiques chimiques

Chlorures

La teneur en ions chlorures solubles dans l'eau doit être connue afin de faire le bilan en chlorure du béton.
La quantité de chlorures contenue dans le béton doit être maîtrisée afin de limiter les risques de corrosion des armatures. Certains chlorures sont de surcroît accélérateurs de prise et de durcissement du béton. Ils se retrouvent essentiellement dans les granulats marins mal lavés.



Fig 1.3.10
Lavage industriel des gravillons

Soufre et sulfates solubles

Les teneurs en soufre total et en sulfates sont des caractéristiques qui régionalement sont indispensables pour évaluer l'impact d'une source de granulat dans la durabilité des bétons vis-à-vis d'éventuelles réactions ettringétiques secondaires.
A noter que dans le cas des granulats recyclés, la méthode d'essais est modifiée pour ne recueillir que les sulfates solubles dans l'eau. En effet, les sulfates liés présents dans la fraction mortier en seraient libérés par l'attaque acide de la méthode d'essais granulat naturel avec comme conséquence une valeur largement surévaluée de la teneur en sulfates actifs.

La présence de sulfures de fer (pyrite, marcassite, ...) est une information à prendre en compte dans le cas de béton dont l'aspect esthétique est une caractéristique importante (risque de taches de rouille).

Propreté

Une propreté insuffisante des granulats est préjudiciable à la qualité du béton. Il en résulte, par exemple, une altération de la prise et du durcissement ainsi qu'une diminution de la résistance au gel. Raison pour laquelle beaucoup de granulats doivent être lavés (fig 1.3.10.), afin d'être exempts de matières organiques, dangereuses pour l'hydratation des ciments, et de particules argileuses, dont la nocivité sera appréciée par des essais tels que équivalent de sable et bleu de méthylène.

Les adjuvants

Définition et classification

L'emploi d'adjuvants répond à des considérations techniques et économiques. Certaines performances du béton frais et du béton durci ne peuvent être atteintes qu'avec l'aide d'adjuvants. Les adjuvants peuvent contribuer à diminuer le coût de la main-d'oeuvre et des matériaux ou celui de l'énergie de malaxage. En facilitant la mise en place des bétons, ils rendent possible l'application de méthodes plus économiques lors de la réalisation des chantiers.

Il convient généralement de procéder à des essais préliminaires en vue de déterminer l'efficacité des adjuvants.

La conformité des adjuvants pour le béton est régie par la norme NBN EN 934-2.

Les adjuvants sont constitués de molécules organiques, de synthèse ou naturelle, et de sels dissous dans l'eau. Ils sont ajoutés au béton lors du malaxage. Par leur action chimique ou physique, ces substances modifient certaines propriétés du béton frais ou du béton durci comme par exemple l'ouvrabilité, la prise, le durcissement ou la résistance au gel.

Classification des adjuvants

Adjuvants	Effets principaux
Plastifiants	Diminution du rapport E/C et/ou amélioration d'ouvrabilité Augmentation des résistances mécaniques Défloculation des grains de ciment
Superplastifiants (ou « fluidifiants »)	Forte réduction du rapport E/C et/ou fort allongement des temps d'ouvrabilité Forte augmentation des résistances mécaniques Défloculation des grains de ciment Fluidification des bétons
Accélérateurs de prise ou de durcissement	Utilisation hivernale des bétons Accroissement de la vitesse de montée en résistance des bétons Réduction des temps de prise des bétons
Retardateurs de prise	Utilisation des bétons en été Accroissement des temps d'ouvrabilité et des temps de prise Régulation de la chaleur d'hydratation
Entraîneurs d'air	Protection des bétons contre les actions du gel et des sels de déverglaçage par création d'un réseau de micro bulles d'air
Hydrofuges	Réduction de la capillarité et de l'absorption capillaire des bétons Renforcement de « l'étanchéité » des bétons Possibilité de réduire certaines efflorescences

Dosage

En général, les adjuvants sont introduits sous forme liquide, en petites quantités, lors du malaxage. Leur pourcentage en poids par rapport au ciment se situe en général entre 0,2 et 2 %. Le dosage doit de toute façon être effectué selon les directives des fabricants.

Pour des dosages supérieurs à 3l/m^3, on tiendra compte de la part d'eau ainsi introduite dans la formulation de la recette de béton. Il en va de même pour l'air introduit dans le mélange par les entraîneurs d'air.

Les dosages inférieurs à 0,2 % doivent être évités, car d'aussi petites quantités sont incompatibles avec le degré de précision courant des doseurs.

Les sous-dosages diminuent très rapidement l'effet recherché, alors que les surdosages peuvent avoir des effets indésirables tels que ralentissement de la prise, ségrégation ou perte de résistance à la compression.

Les adjuvants

Principaux types d'adjuvants

Les Plastifiants et Superplastifiants

Ils sont de loin les adjuvants les plus utilisés pour la confection du béton. Les plastifiants ont un effet « réduit » car moins concentrés ou provenant de dérivés du bois ou du maïs. Les superplastifiants plus puissants proviennent de la synthèse de molécules. Sur ceux-ci s'est concentré l'essentiel de l'effort de recherche des adjuvantiers : après les « mélamines » (PMS) et les « naphtalènes » (PNS), les « polycarboxylates » (PCP) ont ouvert de nouvelles possibilités dans la réalisation des bétons et sont en passe de supplanter les 2 premiers. Leur utilisation doit toujours s'accompagner d'un réglage soigné de la répartition des fines particules du béton. Le mode d'action de ces adjuvants peut être décrit comme suit (voir fig. 1.4.1) :

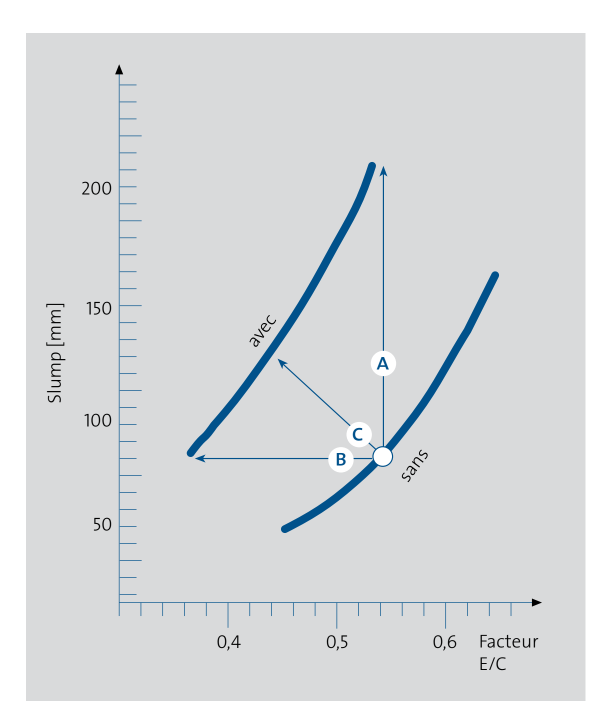


Fig. 1.4.1
Effet d'un superplastifiant

- Pour un rapport E/C constant, les superplastifiants améliorent l'ouvrabilité du béton (A). Ce mode d'action est recherché pour les applications courantes du Béton Prêt à l'Emploi, pour prolonger les temps d'ouvrabilité ou encore pour bétonner par temps chaud. Le confort d'utilisation, et donc la qualité des réalisations sont grandement améliorés quand le superplastifiant est ainsi utilisé.

- A ouvrabilité constante, les superplastifiants permettent de réduire l'eau nécessaire, donc le rapport E/C (B). Les plastifiants permettent une réduction de ce rapport d'au moins 5% et les superplastifiants d'au moins 12%. Il en résulte un accroissement des résistances, de la compacité et de la durabilité des bétons. Ce mode d'action est recherché pour la confection de Bétons Hautes Performances, en particulier dans la préfabrication, ou encore pour bétonner par temps froid, la réduction d'eau compensant les températures froides. Les propriétés du béton se trouvent quasiment toutes améliorées quand le superplastifiant est utilisé pour réduire la quantité d'eau.

- Dans la pratique, c'est une action combinée (C) qui est obtenue, plus ou moins prononcée dans un sens ou dans l'autre.

L'intérêt des superplastifiants se retrouve dans l'optimisation des facteurs coût, ouvrabilité et caractéristiques finales du béton. Les superplastifiants sont devenus incontournables dans la réalisation des nouveaux bétons : BHP, mais aussi bétons autoplaçants ou bétons autonivelants.
Comme effet secondaire des superplastifiants, il faut signaler un ralentissement de la prise en cas de trop fort dosage, et des difficultés parfois à régler le pourcentage d'air entraîné en combinaison avec les entraîneurs d'air.
Il est important de vérifier la bonne compatibilité entre les ciments (et dans une moindre mesure, les granulats) et ces types d'adjuvant, surtout en cas de dosage élevé ou lors de l'utilisation simultanée de plusieurs adjuvants.

Les accélérateurs

Les accélérateurs, improprement appelés parfois antigels, avancent le début de prise en libérant plus rapidement la chaleur d'hydratation du ciment. La plupart d'entre eux accélèrent également le durcissement du béton.
Ils permettent ainsi de décoffrer, de mettre en charge, ou d'exposer le béton au gel dans un délai plus court.
L'effet des accélérateurs dépend beaucoup de leur constitution chimique et de celle du ciment utilisé. Pratiquement ils entraînent toujours une perte plus ou moins importante de la résistance finale du béton (fig. 1.4.2).
En cas de surdosage, on peut observer un ralentissement au lieu d'une accélération de la prise et du durcissement (effet contraire).
Les premiers accélérateurs, à base de chlorures, ne sont plus utilisés de nos jours que dans le béton non armé du fait de leur action corrosive sur les armatures.
Leur effet étant difficile à maîtriser, les accélérateurs n'entrent en ligne de compte que dans des cas très particuliers :

- béton projeté (on parle ici d'accélérateurs raidisseurs, préférentiellement non alcalins)
- bétonnage par temps froid
- délais de décoffrage très courts
- bétonnage au contact d'eaux courantes
- ancrages
- travaux de réparation
- étanchement d'infiltrations et de voies d'eau.

Les retardateurs

Ces adjuvants retardent le début de la prise du ciment et prolongent ainsi le délai de mise en place du béton.
Les applications principales des retardateurs sont les suivantes :

- bétonnage par temps chaud
- transports sur des longues distances
- bétonnage de gros volumes ou de grandes surfaces
- suppression des joints de travail en cas d'arrêts programmés (pas de discontinuité entre les étapes de bétonnage)
- étalement de la chaleur d'hydratation dégagée dans la masse du béton.

Un béton avec retardateur durcit moins vite au jeune âge (fig. 1.4.2), mais sa résistance à 28 jours est souvent un peu plus élevée que celle d'un béton sans retardateur. Du fait de son durcissement initial ralenti, un béton avec retardateur nécessite une cure particulièrement attentive.
Comme l'effet recherché dépend beaucoup du type de retardateur, mais aussi du ciment utilisé et de la température ambiante, il est indispensable de procéder à des essais préalables, à différentes températures.
En cas de surdosage, l'effet des retardateurs peut s'inverser et devenir accélérateur.

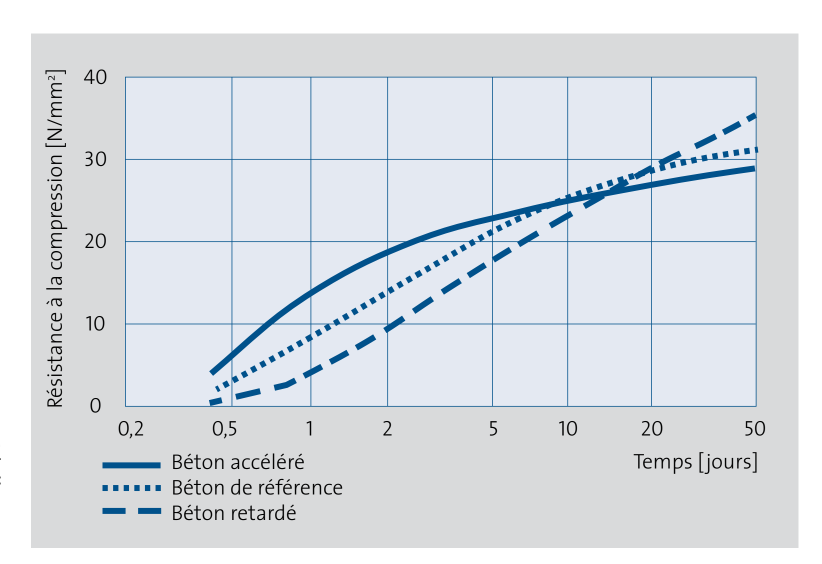


Fig. 1.4.2

Résistance mécanique du béton : effet des retardateurs et des accélérateurs

Les adjuvants

Les entraîneurs d'air

Le rôle des entraîneurs d'air consiste à stabiliser, en un réseau dense de micro bulles d'air, l'air naturellement généré lors du malaxage du béton. On améliore ainsi sensiblement la résistance du béton au gel en présence de sels de déverglaçage (voir chap. 3.5). Il en résulte également une amélioration de l'ouvrabilité. Un effet indésirable des entraîneurs d'air est la perte de résistance mécanique liée à leur utilisation.

Les bulles introduites dans le béton frais restent présentes dans le béton durci. En cas de gel, elles absorbent en partie l'eau mise en mouvement dans les capillaires. Le risque d'éclatement du béton par surpression de la glace s'en trouve ainsi réduit (fig. 1.4.3). En outre, ces micro bulles d'air diminuent la continuité du réseau capillaire du béton et réduisent ainsi sa capacité d'absorption d'eau.

Dans la plupart des cas, une très petite quantité d'adjuvant suffit pour obtenir la teneur en air souhaitée. De toute manière, la teneur en air ne dépend pas seulement du type et du dosage de l'adjuvant, mais également de toute une série d'autres facteurs : type de ciment, nature des granulats et courbe granulométrique du sable, consistance, température, intensité et durée du malaxage, présence d'autres adjuvants ou ajouts, durée de transports, etc. La compatibilité de nouvelles formulations doit absolument être vérifiée par des essais de convenance.

Fig. 1.4.3
Bulle d'air entraîné jouant le rôle de vase d'expansion

Règle pratique

1 % d'air entraîné dans le béton correspond à une réduction possible d'eau de gâchage d'environ 5 litres par m³ et produit sur l'ouvrabilité le même effet que 10 à 15 kg de fines.

1% d'air entraîné correspond environ à une réduction de 5% des résistances à 28 jours.

Règles générales pour l'utilisation des adjuvants

Si les adjuvants permettent souvent d'obtenir des performances intéressantes, il ne faut jamais perdre de vue qu'ils introduisent une complexité dans le système ciment-eau-granulats. C'est pourquoi tout usage d'adjuvant requiert beaucoup d'attention de la part des exécutants.

- Le mélange de certains adjuvants peut produire des réactions indésirables.
  Il faut donc éviter en premier lieu toute combinaison d'adjuvants provenant de producteurs différents.
- Sauf indication particulière, les adjuvants doivent être introduits dans le malaxeur après l'eau de gâchage, lorsque le mélange est déjà convenablement mouillé.

Récapitulatif

Effet sur	Superplastifiant	Accélérateur	Retardateur	Entraîneur d'air
L'ouvrabilité	++	-	+	+
La ségrégation / le ressuage	+		-	+
La prise				
• accélération		++		-
• retard	-		++	-
L'aptitude au pompage	+			
La résistance au jeune âge	+	++	-	-
La résistance finale	+	-	+	-
La perméabilité	+	-		
La résistance au gel en présence de sels de déverglaçage	+	-		++
Le bétonnage par temps froid	+	+	-	
Le bétonnage par temps chaud		-	+	

++ effet recherché   + effet positif possible   - risque d'effets indésirables



Fig. 1.4.4

Pompes à adjuvant

Les additions et les ajouts

Généralités

Les additions et ajouts sont des substances qui améliorent certaines propriétés du béton telles que l'ouvrabilité du béton frais, la résistance et la compacité du béton durci, ou lui confèrent certaines propriétés particulières telles que la teinte.
Contrairement aux adjuvants, les quantités d'ajout incorporées au béton sont suffisamment importantes pour être prises en considération dans le calcul volumique.

La norme NBN EN 206-1 définit les additions comme des matériaux minéraux finement divisés, il existe 2 types d'additions :

- les additions de type I (quasiment inertes)
- les additions de type II (à caractère hydraulique ou pouzzolanique latent).

Les additions de type II peuvent être prises en compte dans le calcul de la teneur en liant, avec le concept du coefficient k.

On peut déterminer en conformité avec la norme NBN EN 206-1 le dosage de l'addition et éventuellement adapter les formulations aux exigences requises pour certaines parties d'ouvrage. Cet avantage ne va cependant pas sans quelques inconvénients :

- Le stockage séparé des additions et ajouts demande des silos, des équipements de dosage et des contrôles supplémentaires.
- Certains ajouts ont tendance à former des grumeaux lors d'un stockage prolongé.

Les ajouts sont des produits incorporés au béton et qui ne sont ni des ciments ni des granulats ni de l'eau de gâchage ni des additions. Il s'agit par exemple de fibres, de produits augmentant la viscosité ou la thixotropie, les colorants...
Les ajouts ne peuvent être pris en compte pour le concept du coefficient k.

Les principaux ajouts et additions

Les fillers calcaires et siliceux
Les fillers calcaires et siliceux peuvent améliorer la granulométrie du béton dans le cas d'utilisation de sables pauvres en fines lorsqu'on ne dispose pas de sable correcteur.

Ces fillers sont également utilisés pour confectionner des bétons autonivelants (BAN) ou des bétons autoplaçants (BAP). Dans ce cas, leur utilisation permet d'augmenter la quantité de pâte nécessaire pour obtenir un écoulement des bétons sans vibration.

Ces fillers doivent répondre à la norme NBN EN 12620 et appartiennent aux additions de type I.

Fibres
Parmi les fibres synthétiques, les fibres de polypropylène sont les plus utilisées. Elles permettent d'éviter dans une large mesure les fissures dues au retrait plastique. A part le choix de la fibre la plus appropriée pour chaque application, leur mise en œuvre est relativement simple et ne requiert aucun dispositif ni aucune mesure particulière. Le dosage habituel est d'environ 1 kg de fibres par m^3 de béton.

Lorsqu'elles sont bien réparties, les fibres d'acier améliorent certaines propriétés mécaniques du béton, notamment la résistance à la traction et la ductilité (le béton devient moins cassant). Leur utilisation nécessite toutefois les conseils d'un spécialiste, car l'efficacité des fibres d'acier dépend de leur longueur, de leur diamètre et de leur forme qui doivent être choisis en fonction de l'application prévue. Leur dosage oscille en général entre 20 et 70 kg par m^3 de béton, mais il peut aussi arriver que cette valeur monte jusqu'à 150 kg/m^3. Pour les dosages élevés, l'incorporation des fibres pendant le malaxage nécessite un équipement particulier assurant une répartition homogène, sans agglomérats. L'utilisation de fibres d'acier implique en général un léger surdosage en ciment et en sable et une perte d'ouvrabilité.

Les fibres de verre sont utilisées en préfabrication en tant qu'armature d'éléments de faible épaisseur. Leur

Les additions et les ajouts



Fig. 1.5.1
Différents types de fibres : fibre acier, fibre polypropylène et morceaux d'armature béton

mise en œuvre est délicate et demande l'expérience d'un spécialiste confirmé. La stabilité à long terme de ce type de fibres est assez variable, fonction surtout de leur provenance.

La norme NBN EN 14650 traite des règles générales pour le contrôle de la production en usine de béton de fibres métalliques.

Pigments minéraux
Les pigments minéraux sont utilisés pour colorer le béton et le mortier (fig. 1.5.2). En pratique, seuls les pigments à base d'oxydes satisfont aux exigences requises en matière de granulométrie et de stabilité.

Les exigences relatives aux pigments pour bétons sont régies par la norme EN 12878.

Les pigments n'ont pas d'effet chimique sur le béton, mais leur besoin en eau relativement élevé nécessite en général une augmentation du facteur eau/ciment (E/C) ou l'emploi simultané d'un superplastifiant.
C'est généralement l'intensité de la teinte recherchée qui conduit au choix du dosage en pigment (quelques pour-cent par rapport au poids de ciment), mais les dosages courants et maximums figurent dans la documentation de tous les fournisseurs.

Avant et après la confection de bétons teintés, il faut soigneusement nettoyer le malaxeur, les véhicules de transport, les dispositifs de transbordement et les outils sous peine de maculer les gâchées suivantes.
Avec le temps, une certaine atténuation de la teinte des bétons colorés est inévitable, même avec les meilleurs pigments.



Fig. 1.5.2
Pavés en béton coloré

La bonne exécution d'ouvrages ou de parties d'ouvrages en béton teinté nécessite une certaine expérience:

- Un mélange de béton parfaitement homogène
- L'utilisation d'un sable clair
- L'utilisation de ciment clair voire blanc et un dosage très précis du pigment.

figurent au nombre des conditions de base indispensables pour obtenir des surfaces de béton apparent claires et de teinte uniforme. En revanche, la couleur du gravier ne joue qu'un rôle mineur.
Voir également le chap. 2.10 sur l'influence du coffrage.

Les additions et les ajouts



Fig. 1.5.3

Cendres volantes, photo prise au microscope électronique à balayage

Cendres volantes

Les propriétés et les avantages des cendres volantes ont été définis dans le chapitre 1.1, le ciment.

Les exigences relatives aux cendres volantes pour bétons sont régies par la norme NBN EN 450-1.

Les cendres volantes peuvent être utilisées comme addition de type II. Leur coefficient k dépend du ciment utilisé et peut varier de 0 à 0.4.

Fumée de silice

En raison de son extrême finesse et de sa haute teneur en silice, la fumée de silice (parfois aussi appelée microsilice) possède un indice d'activité pouzzolanique très élevé. Son coefficient k est de 1 ou 2, selon le cas (voir NBN EN).
La fumée de silice doit répondre aux exigences de la norme NBN EN.

Environ 100 fois plus fine que le ciment, elle peut de ce fait occasionner des problèmes de dosage ou d'homogénéité lors de la confection du béton.
La fumée de silice est commercialisée sous deux formes principales :

- en poudre, densifiée (allongement important du temps de malaxage : t > 180 secondes)
- en suspension aqueuse, facile à doser (attention au gel et à la sédimentation lors du stockage)

Un dosage de 5 à 10 % de fumée de silice (rapporté au poids de ciment) améliore sensiblement certaines propriétés du béton :

- Accroissement de la cohésion et de la capacité de rétention d'eau du béton frais, d'où diminution du risque de ségrégation
- En béton projeté, importante diminution du rebond
- Forte diminution de la porosité de la pâte de ciment ayant comme conséquence un accroissement sensible de la durabilité.
  Dans le cas d'utilisation des fumées de silice pour confectionner des BHP, nous pouvons observer une augmentation de la résistance:
  - aux cycles de gel,
  - au gel en présence de sels de déverglaçage,
  - à l'abrasion,
  - aux eaux sulfatées et à diverses agressions chimiques,
  - à l'avancement du front de carbonatation.
- Accroissement significatif de la résistance mécanique. L'ajout de fumée de silice permet d'obtenir des bétons à hautes performances, mais l'élévation du module d'élasticité qui s'ensuit pénalise quelque peu la ductilité du béton armé.

Pour des dosages compris entre 5 et 10 %, l'utilisation de la fumée de silice devrait toujours être combinée avec celle d'un superplastifiant et validée par des essais préliminaires de convenance pour éviter par exemple des problèmes d'ouvrabilité lors de l'exécution.


Fruval

Composition du béton

Il ressort de la fig. 2.1.1 que les granulats constituent l'élément prédominant du béton, tant au point de vue du volume qu'au point de vue de la masse.
Afin d'assurer l'ouvrabilité du béton frais et l'hydratation du ciment, l'eau de gâchage doit mouiller la surface de l'ensemble des grains du mélange. Il est donc également intéressant de considérer les constituants du béton sous l'angle de leur surface développée. De ce point de vue-là, le ciment est de loin l'élément dominant. C'est aussi le seul composant qui génère une résistance mécanique en se combinant avec l'eau.

Formulation du béton

En déterminant la composition d'un béton donné le praticien doit avant tout veiller à optimiser les points suivants :

- l'ouvrabilité
- la résistance mécanique
- la durabilité
- le coût

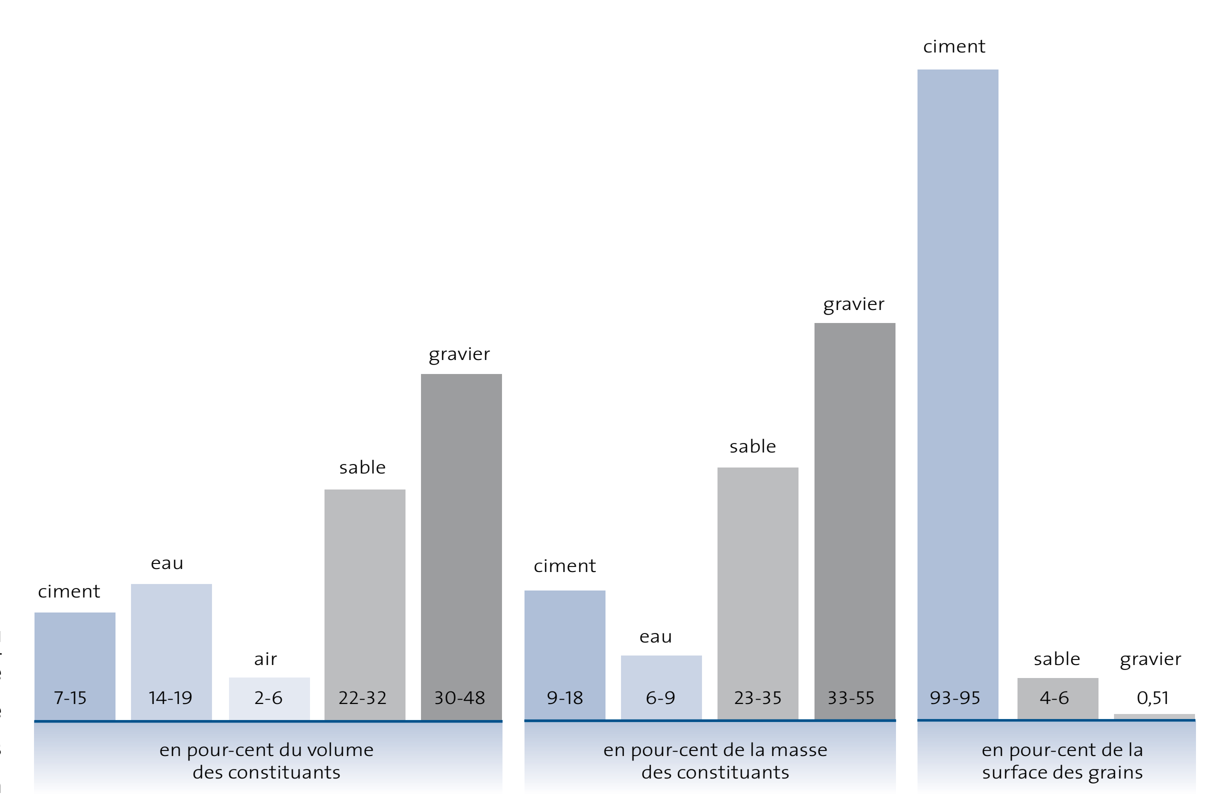


Fig. 2.1.1
Importance relative des constituants du béton

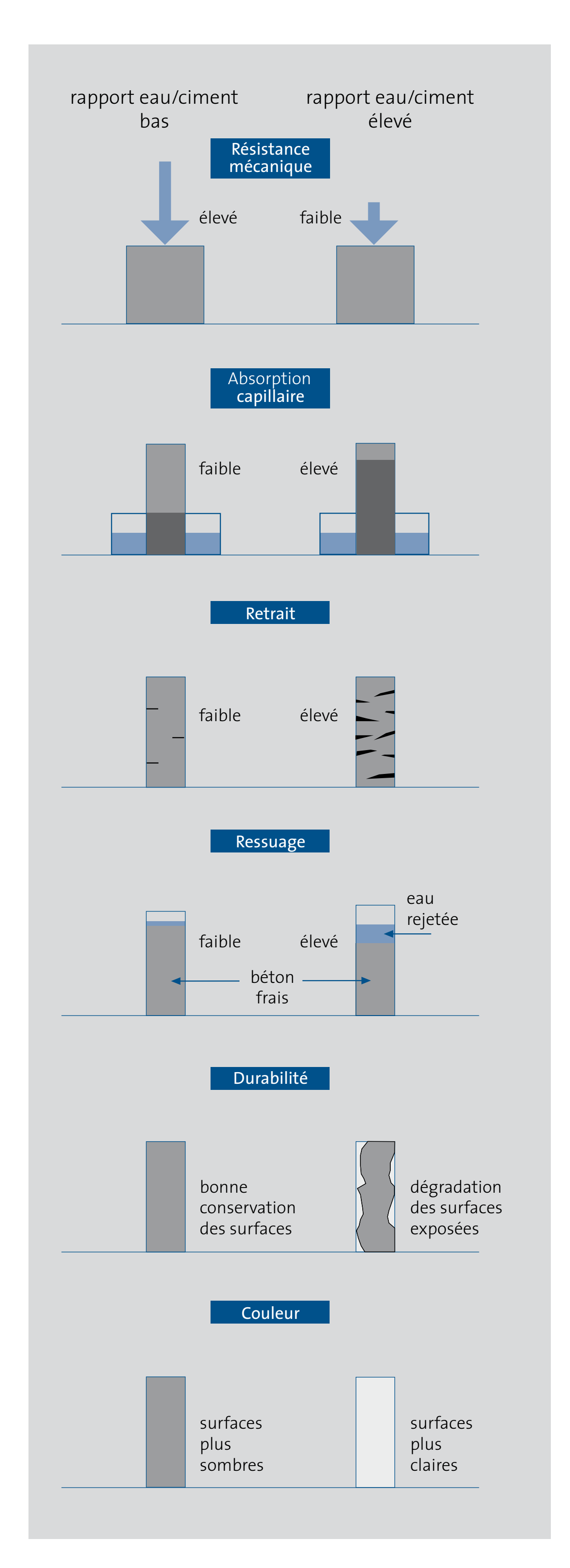


Fig. 2.1.2

Influence du rapport E/C sur les propriétés du béton

Importance du rapport eau / ciment (rapport E/C)

Le rapport eau/ciment est l'un des facteurs clés qui influencent de manière prépondérante l'ensemble des propriétés du béton (fig. 2.1.2).
En prescrivant les propriétés requises d'un béton, l'ingénieur limite dans bien des cas le rapport E/C.
Dans la pratique, il est toutefois fastidieux de mesurer avec précision la teneur en eau de chaque béton. C'est pour cette raison que l'on se base le plus souvent, lors de la fabrication en centrale, sur la mesure de la plasticité. Pour une composition donnée, celle-ci est en étroite relation avec la teneur en eau et plus facile à mesurer. Avec l'expérience, ce procédé donne une approximation suffisante du résultat mais ne remplace pas une mesure réelle de la teneur en eau du béton.

Choix du rapport eau / ciment

Le choix du rapport E/C dépend avant tout de l'environnement et des contraintes mécaniques auxquelles sera soumis le béton durci (fig. 2.1.3). La norme NBN EN 206-1 formule des exigences précises en la matière. Parfois sur un chantier particulier, le rapport E/C peut être prescrit d'une manière plus exigeante que la norme. Ces projets faisant état d'exigences de cet ordre sont assortis de conditions de soumission particulières imposant un surcroît de précautions à la mise en œuvre.

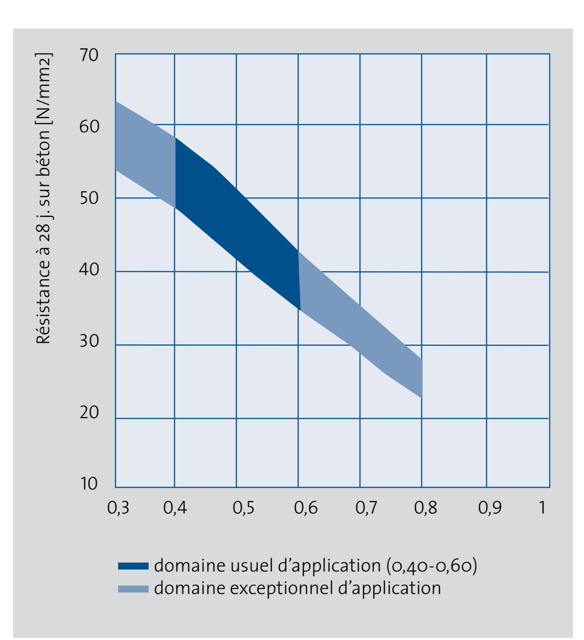


Fig. 2.1.3

Influence du rapport E/C sur la résistance à la compression

Composition du béton

Dosage minimum en ciment

Un dosage en ciment suffisant protège efficacement les armatures contre la corrosion. Cette protection est assurée par la forte alcalinité de l'hydroxyde de calcium qui se forme pendant la prise et par une faible porosité du béton. Pour que ces deux conditions soient toujours remplies, la norme NBN B15-001 prescrit, par exemple, que le béton armé mis en place dans un environnement de type EE3, (environnement extérieur, exposé à la pluie et au gel), doit contenir minimum 320 kg de ciment par m^3 de béton fini. Ce dosage peut toutefois être réduit ou augmenté pour les différentes parties d'ouvrage qui sont plus ou moins exposées durablement aux intempéries ou à d'autres agressions (cf. tableau F1, F2 et F3 de la NBN B15-001).

Porosité du béton

Un mélange de granulats bien proportionné suivant une courbe granulométrique continue donnera un béton présentant une bonne ouvrabilité, une cohésion élevée et une tendance réduite à la ségrégation. Le béton aura du même coup une faible porosité, ce qui lui conférera une durabilité élevée (fig. 2.1.4 et 2.1.5). Les mélanges à granulométrie discontinue ne sont à utiliser que dans des cas spécifiques et avec beaucoup de précautions.

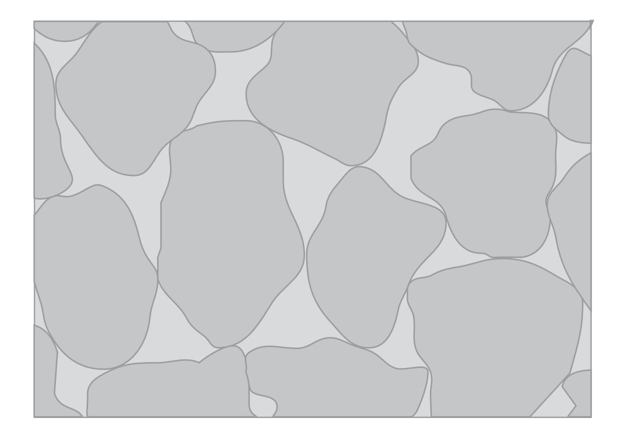


Fig. 2.1.4
Un béton monogranulaire présente un faible degré de remplissage : sa porosité est élevée (représentation schématique)

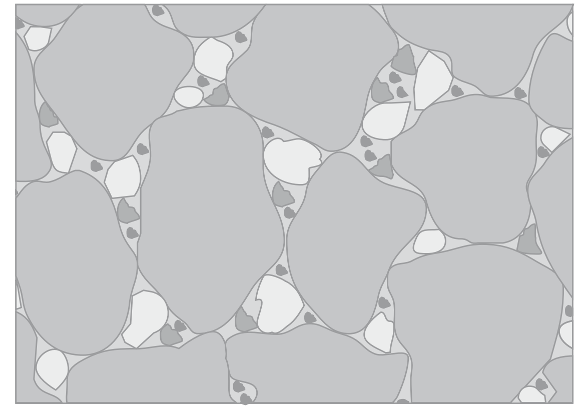


Fig. 2.1.5
Un béton à granulométrie continue et optimale présente un degré de remplissage élevé : sa porosité est faible (représentation schématique)

Calcul volumique

Le calcul de la composition pondérale d'un béton est basé sur le volume absolu qu'occupe chacun des composants dans 1 m³ ou 1000 litres de béton en place. Ce volume s'obtient en divisant le poids de chacun des composants par son poids spécifique.

Mis à part les granulats, le poids des autres composants est connu :

- le ciment, par son dosage
- l'eau, par le rapport E/C
- les adjuvants et ajouts, par leur dosage

Pour obtenir les dosages effectifs à utiliser en centrale, il faudra:

1. majorer chaque fraction granulaire du poids d'humidité qu'elle contient (en général 4 à 6 % pour le sable et 1 à 3 % pour le gravier).
2. réduire d'autant la quantité d'eau de gâchage
3. tenir compte du coefficient d'absorption des granulats pour l'ajouter à l'eau de gâchage.

L'exemple ci-dessous propose un schéma de calcul de la composition pour un mètre cube de béton compacté, formulé pour un béton armé en classe d'environnement EE3.

Exemple :

Données selon NBN EN B15-001	Constituants	Masse (kg/m³)	Masse volumique (kg/m³)	Volume (l/m³)	Détail calcul
C_{min} = 320	Ciment	320	3,1	103	320/3,1 = 103 l
E_{eff}/C_{max} =0,50	Eau efficace	160	1	160	320 x 0,50 = 160 kg
	Plastifiant (1%)	3,2	1,1	2,9	320 x 1% = 3,2 kg
	Eau de gâchage	157	1	157	160 - 2,9 = 157 l
	Air occlus (1,5%)			15	1000 l x 1,5% =15 l
	Volume de pâte			278	103 + 160 + 15 =278 l
	Granulats secs	1913	2,65	722	1000 - 278 = 722 l
	Béton		2393	1000	103+157+2,9+722

Classification des bétons



Fig. 2.2.1
Essai de résistance à la compression sur cube

La norme béton NBN EN 206-1 et le supplément national NBN B15-001 :

> sont la base normative pour tous les bétons de structure.
> classifient les bétons sur base de critères d'exposition du béton (13 classes d'environnement) et de caractéristiques de béton frais et durci.

Classe de résistance à la compression

Le béton est tout d'abord classifié selon sa résistance à la compression.

Les classes de résistances sont toujours désignées par la lettre « C », de l'anglais concrete, suivie de 2 valeurs correspondant aux résistances mesurées respectivement sur éprouvettes cylindriques et cubiques.

Exemple : **C 30/37**

C indique qu'il s'agit de béton de masse volumique normale ou de béton lourd,

30 désigne la résistance caractéristique à la compression mesurée sur cylindre (Ø 150mm, h = 300 mm),

37 désigne la résistance caractéristique à la compression mesurée sur cube de 150 mm d'arête.

La norme européenne définit 16 classes de résistance entre C8/10 et C100/115.

Si la masse volumique de béton est inférieure à 2000kg/m³, on parle de béton léger. A ce moment, cette classification commence par « LC », de l'anglais light concrete, avec 14 couples de résistance variant de LC8/9 à LC80/88.

Classe d'environnement

Chaque béton est soumis à un environnement spécifique qui peut avoir un effet sur sa durabilité.

La norme NBN B 15-001 introduit la notion de classe d'environnement. Treize classe d'environnements courants en Belgique on été définies et s'appliquent généralement aux pratiques belges en matière de béton (voir tableau 2.2.1).

Domaine d'utilisation

Comme les exigences de durabilité sont différentes selon que le béton est armé ou non, il faut indiquer si le béton est non-armé (BNA), armé (BA) ou précontraint (BP).

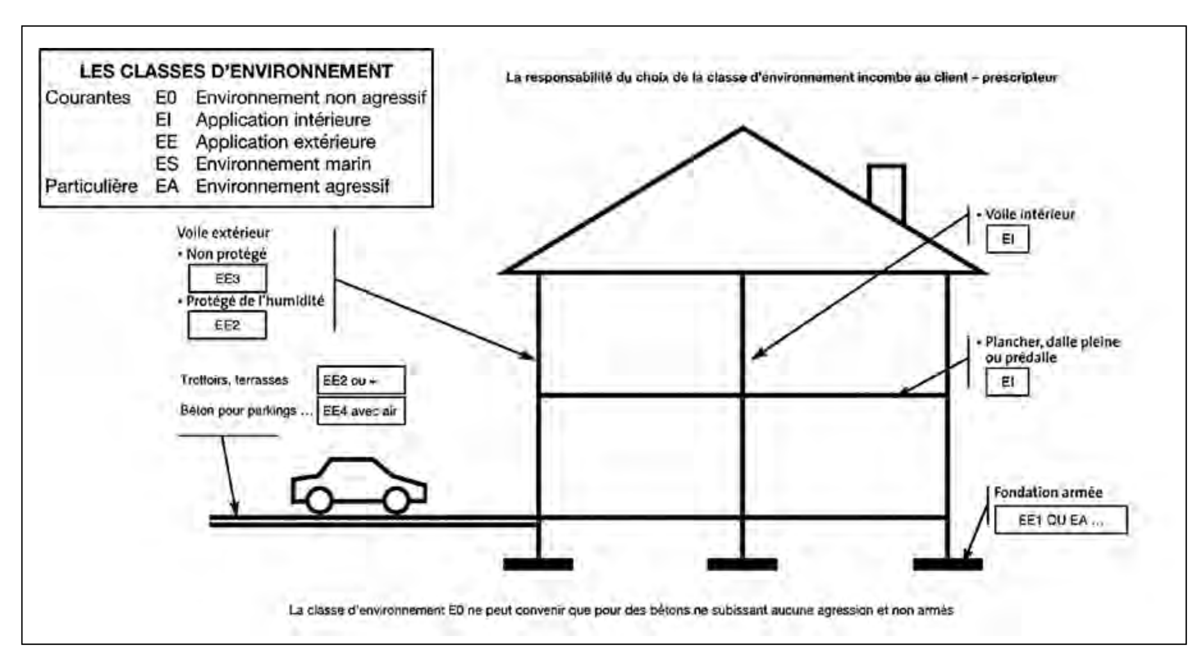
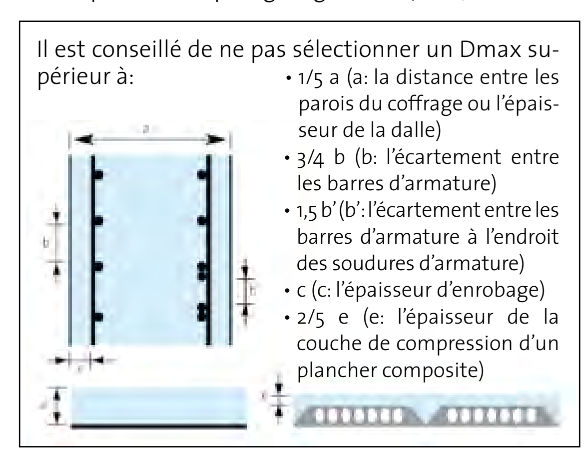


Fig. 2.2.2
Exemples de classes d'environnement courantes

Dimension maximale du granulat

Un béton peut également être classifié par la dimension supérieure du plus gros granulat (D_{max}).



Il est conseillé de ne pas sélectionner un Dmax supérieur à:

- 1/5 a (a: la distance entre les parois du coffrage ou l'épaisseur de la dalle)
- 3/4 b (b: l'écartement entre les barres d'armature)
- 1,5 b' (b': l'écartement entre les barres d'armature à l'endroit des soudures d'armature)
- c (c: l'épaisseur d'enrobage)
- 2/5 e (e: l'épaisseur de la couche de compression d'un plancher composite)

Classe de consistance

L'ouvrabilité est caractérisée par différents essais de consistance (fig. 2.2.3.): l'affaissement au slump (S), le Vébé (V), le serrage (C) ou l'étalement (F). Il n'y a pas de liens directs entre les classes définies par chaque essai.

Exigences complémentaires

En plus de ces spécifications générales, un béton peut bien entendu avoir des exigences complémentaires telles que le type de ciment, de granulat, la température du béton frais, le dégagement de chaleur,...

Tableau. 2.2.1

Classes d'environnement

Classes d'environnement			Bétons non armés			Bétons armés et précontraints		
Classe	Description	Exemples d'applications	Classe de résistance minimale	Cmin	E/C max	Classe de résistance minimale	Cmin	E/C max
E0	Environnement non agressif		C 12/15 ou C 8/10 (1)	-	1,00 ou 1,50 (1)	Pas d'application		
EI	Application intérieure	Parois intérieures des habitations ou de bureaux	C 12/15	-	1,00	C 16/20	260	0,65
EE	Application extérieure							
EE1	Pas de gel	Fondations sous le niveau de gel	C 12/15	-	1,00	C 20/25	280	0,60
EE2	Gel, mais pas de contact avec la pluie	Garages ouverts-couverts, vides sanitaires, passages ouverts dans un bâtiment	C 25/30	300	0,55	C 25/30	300	0,55
EE3	Gel et contact avec la pluie	Murs extérieurs exposés à la pluie	C 25/30	300	0,55	C 30/37	320	0,50
EE4	Gel et agents de déverglaçage (présence d'eau contenant des agents de déverglaçage) (2)	Eléments d'infrastructures routières sans imposition sur la teneur en air	C 35/45	340	0,45	C 35/45	340	0,45
		Eléments d'infrastructures routières avec imposition sur la teneur en air (minimum 4 %)	C 25/30	320	0,50	C 30/37	340	0,45
ES	Environnement marin							
	Pas de contact avec de l'eau de mer, mais bien avec de l'air marin jusqu'à 3 km de la côte et/ou avec de l'eau saumâtre							
ES1	Pas de gel	Fondations sous le niveau de gel exposées à de l'eau saumâtre	C 20/25	280	0,60	C 30/37	320	0,50
ES2	Gel	Murs extérieurs de bâtiments exposés à la pluie en zone côtière	C 25/30	300	0,55	C 30/37	320	0,50
	Contact avec de l'eau de mer							
ES3	Eléments immergés		C 25/30	300	0,55	C 35/45	340	0,45
ES4	Eléments exposés aux marées et aux éclaboussures (2)	Murs de quais – béton sans imposition sur la teneur en air	C 35/45	340	0,45	C 35/45	340	0,45
		Murs de quais – béton avec imposition sur la teneur en air (minimum 4%)	C 25/30	320	0,50	C 30/37	340	0,45
EA	Environnement agressif [illegible]							
EA1	Environnement à faible agressivité		C 25/30	300	0,55	C 25/30	300	0,55
EA2	Environnement d'agressivité chimique modérée		C 30/37	320	0,50	C 30/37	320	0,50
EA3	Environnement à forte agressivité		C 35/45	340	0,45	C 35/45	340	0,45

(1) Uniquement autorisé dans des cas exceptionnels de bétons non armés tels que, par exemple, les bétons de propreté de fondation. (2) Béton sans imposition sur la teneur en air sauf si imposé par le prescripteur.

Classification des bétons



Fig. 2.2.3
Différents types de consistance de béton (slump test)

Composition du béton selon les normes NBN EN

En plus de la classification du béton, la norme européenne NBN EN définit des règles générales pour la composition du béton, ceci afin de garantir que le béton résiste aux agressions environnementales.
La plupart des pays européens ont complété les prescriptions de la norme européenne par des spécifications nationales.

En Belgique, il existe un supplément à la norme NBN. Il s'agit de la NBN B. Elle complète la NBN EN par des exigences normatives établies en fonction de l'expérience belge et par des commentaires informatifs. En ce qui concerne la classe de résistance, l'éprouvette de contrôle est le cube. L'exigence en matière de résistance à la compression se réfère donc au 2ème nombre de la classe C ou CL. La norme belge a introduit des classes d'environnement qui remplacent les classes d'exposition de la norme européenne et fait le lien entre les classes d'environnement du béton et les exigences au niveau de la composition. Cette composition est entre autre définie par sa quantité de ciment ou de liant équivalent, par la quantité d'eau (efficace) et par la classe de résistance du béton (tableau 2.2.1).

Liant équivalent
Si en plus du ciment, une addition de type II est ajoutée au béton, le concept du coefficient k peut être introduit.
Liant $_{\text{équivalent}}$ = Ciment + k * Addition

Les normes NBN EN et NBN B donnent les valeurs des coefficients k.

Le liant équivalent peut entrer en ligne de compte pour l'évaluation de la quantité de ciment minimale et E/C $_{\text{max}}$.

Eau efficace
Le concept d'eau efficace est défini comme suit :

Eau $_{\text{efficace}}$ = Eau $_{\text{Totale}}$ – eau absorbée par les granulats
Eau totale = Eau de gâchage + eau contenue dans et à la surface des granulats + eau des adjuvants et des additions.

Le tableau 2.2.1 donne, par classe d'environnement, les spécifications quant à la formulation des bétons.

Importance de l'ouvrabilité

Une bonne ouvrabilité facilite les transbordements et la mise en œuvre du béton, c'est-à-dire sa mise en place dans les coffrages et son compactage. Elle influence aussi favorablement le coût de ces opérations. Quant au béton durci, sa résistance et surtout sa durabilité dépendent directement d'une bonne mise en place, de l'enrobage parfait des armatures et d'un compactage soigné, toutes qualités qui ne peuvent être obtenues qu'avec une bonne ouvrabilité.

Définition de l'ouvrabilité et de la consistance

Le concept d'ouvrabilité du béton ne répond pas à une définition précise. Il englobe plusieurs propriétés comme la consistance, la cohésion (adhérence interne), la tendance à la ségrégation, la plasticité et la thixotropie. Considérée sur le plan scientifique comme résultant du frottement interne de l'ensemble des particules solides suspendues dans le béton, la consistance peut être évaluée dans la pratique par différentes méthodes de mesure.

Méthodes de mesure de la consistance

En Belgique, on utilise couramment deux méthodes pour évaluer la consistance du béton. Ce sont les mesures de l'affaissement («slump») et de l'étalement. Ces deux méthodes (fig. 2.3.1 et 2.3.2) sont limitées à certains domaines de consistance.

Classe de consistance

Le tableau 2.3.1 donne les classes de consistance définies par la norme NBN EN 206-1 et indique également la méthode de mesure la plus appropriée pour chaque domaine.

Des indications détaillées pour la conduite de ces essais se trouvent dans les normes NBN EN.

Domaine de consistance	Affaissement (slump) S		Etalement F	
	Classe	Mesure en mm	Classe	Mesure en mm
Ferme	S1	10 à 40	F1 (1)	(≤ 340)
Plastique	S2	50 à 90	F2	350 à 410
Très plastique	S3	100 à 150	F3	420 à 480
Fluide	S4	160 à 210	F4	490 à 550
Très fluide	S5 (1)	(≥ 220)	F5	560 à 620
			F6 (1)	(≥ 630)

(1) mesure non appropriée pour le domaine de consistance

Fig. 2.3.1
Classes de consistance

Contrôle de l'ouvrabilité en début de bétonnage

Des valeurs de consistance semblables pour des bétons provenant d'installations différentes ne garantissent pas une ouvrabilité rigoureusement identique. Les résultats peuvent être influencés par le choix des constituants et par le malaxeur utilisé. Il est donc indiqué de vérifier l'ouvrabilité au début du bétonnage et de corriger la consistance si nécessaire. Par la suite, lors d'un éventuel changement dans la fourniture des granulats, il faudra contrôler la valeur de la consistance prescrite pour l'ouvrage en cours.

Ouvrabilité et consistance




Fig. 2.3.1
Mesure du slump





Fig. 2.3.2
Mesure de l'étalement à la table à secousses

Les adjuvants fluidifiants améliorent la consistance

Grâce aux superplastifiants, il est possible de confectionner des bétons ayant un rapport E/C = 0,5 (voire inférieur), tout en offrant une consistance de classes S3 et S4. Ces bétons sont particulièrement appréciés car ils ont l'avantage de se mettre en place et se compacter facilement tout en permettant d'obtenir un béton durci de durabilité élevée.

> L'amélioration de la consistance ne devrait jamais être obtenue par un apport d'eau ultérieur.

Influence des autres caractéristiques du béton sur la consistance

En dehors des adjuvants, d'autres facteurs ont une influence sur la consistance. La modification de l'un ou de plusieurs d'entre eux n'agit pas uniquement sur la consistance, mais également sur la résistance (et sur bien d'autres propriétés) du béton, souvent en sens opposé. Le tableau ci-dessous montre les effets auxquels on peut s'attendre sur la consistance et la résistance, lorsque l'on fait varier certains paramètres de base du béton.

Dès la fin du malaxage, l'ouvrabilité diminue

Il est inévitable qu'à partir de la fin du malaxage la consistance évolue de manière défavorable, ce qui se traduit par une lente perte de l'ouvrabilité. On notera à cet égard que la valeur de référence utilisée correspond soit à la fin du malaxage, soit à la livraison du béton sur le chantier. Cette différence est sensible par temps chaud, tout comme dans le cas d'un ciment à prise plutôt rapide. Il est possible de pallier à cet inconvénient par l'emploi d'un ciment à prise plus lente.

Variation	Effet sur la consistance	Effet sur la résistance à la compression
Amélioration de la continuité de la granulométrie	⬟	◀
Augmentation de la teneur en granulats roulés	⬟	◀
Augmentation de la teneur en granulats concassés	▶	⬟
Augmentation de l'eau de gâchage	⬟	▶
Elévation de la température du béton frais	▶	▶
Utilisation d'un superplastifiant	⬟	⬟
Utilisation d'un entraîneur d'air	⬟	▶
Utilisation d'un retardateur	⬟	⬟

⬟ Effet favorable ▶ Effet défavorable ◀ Pas d'effet notable

Dosage des constituants

La fabrication correcte d'un béton de composition donnée dépend dans une large mesure des équipements de production à disposition. Il faut en effet respecter très précisément les proportions de la formule pour les différents constituants du béton : liant, granulats, eau de gâchage, adjuvants et additions. Pour cela, il existe deux systèmes : le pesage et le dosage volumétrique, ce dernier étant moins précis. L'ordre dans lequel les constituants sont introduits dans le malaxeur revêt une grande importance et doit faire l'objet d'essais préalables. Cet ordre influence en particulier :

- la bonne dispersion des composants
- l'efficacité du malaxage
- l'effet optimal des adjuvants
- le rendement horaire
- l'usure, le nettoyage et l'entretien du malaxeur

Mélange des constituants

Le malaxeur doit intégrer les constituants séparés en un mélange parfaitement homogène tout en répondant aux exigences suivantes :

- intensité de malaxage élevée
- temps de malaxage court
- dispersion rapide des constituants
- enrobage optimal des granulats par la pâte de ciment
- vidange rapide
- usure minimale

Dans les centrales à béton prêt à l'emploi, on utilise principalement des malaxeurs travaillant par charges. Il existe cependant pour chaque type de malaxeur une charge minimale au-dessous de laquelle l'homogénéité ne peut plus être assurée.

Temps de malaxage

Le temps de malaxage nécessaire varie suivant le béton à produire et le type de malaxeur. Il doit être déterminé par des essais.

Définition : **Temps de malaxage** = durée du malaxage à partir de la fin de l'introduction de tous les constituants, y compris l'eau.

S'il est nécessaire d'ajuster la consistance pendant le malaxage en rajoutant de l'eau ou de l'adjuvant, la durée de l'opération doit être allongée en conséquence.



Fig. 2.4.1
Vue intérieure d'un malaxeur de centrale à béton

Fabrication et transport

La pratique et de nombreux essais ont montré qu'en plus de l'homogénéité, d'autres facteurs jouent un rôle important dans la qualité du béton. Ainsi, un malaxage énergique favorise le mouillage et la dispersion du liant, ce qui se répercute favorablement sur la montée en résistance du béton.

Important :
- un temps de malaxage de minimum 45 à 60 secondes est recommandé.
- l'emploi d'un entraîneur d'air nécessite un allongement de cette durée.

L'emploi d'un wattmètre (mesure de la puissance absorbée par le moteur du malaxeur pendant une gâchée de béton) permet de visualiser l'obtention de l'homogénéité suffisante du béton (voir fig 2.4.2)

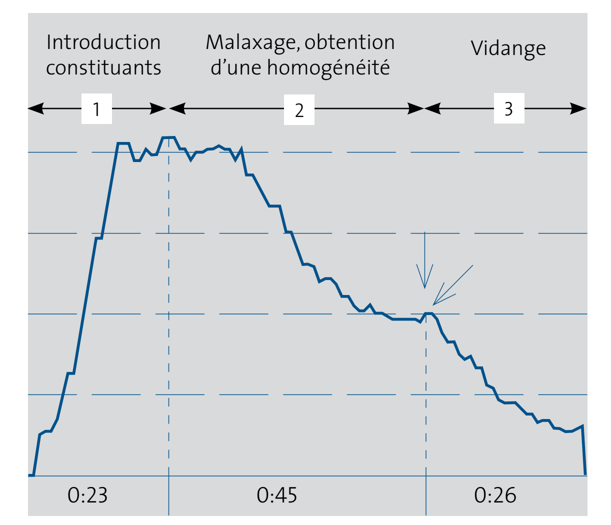


Fig. 2.4.2
Courbe wattmétrique d'un malaxeur de centrale à béton





Transport du béton

Le béton prêt à l'emploi doit être acheminé le plus rapidement possible de la centrale au chantier, généralement en camion malaxeur. Il doit aussitôt être mis en place si l'on veut conserver sa qualité. Pendant le transport, le béton doit être protégé des intempéries, du soleil, des courants d'air et du gel. Il ne faut jamais hésiter à le couvrir pour éviter les pertes d'eau.
A l'arrivée au chantier, le bon de livraison et la conformité de la première fourniture au moins doivent être contrôlés par le responsable des travaux. S'il s'agit de camions malaxeurs, il est indispensable de remélanger le béton à l'arrivée pendant 1 à 2 minutes avant de le décharger, surtout dans le cas de bétons à air entraîné.

L'ajout d'eau supplémentaire est à proscrire dans tous les cas, car cette eau diminue la qualité du béton et sa dispersion peut être problématique. Toutefois, si le responsable des travaux juge un tel ajout indispensable, celui-ci doit être mentionné sur le bon de livraison et le béton, s'il est certifié, perd son label de conformité à la norme. Pour les véhicules sans possibilité de malaxage, l'addition d'eau est à exclure dans tous les cas.
Si un véhicule ne peut pas être immédiatement déchargé à son arrivée au chantier, il doit pouvoir attendre dans un endroit abrité (à l'ombre). Si l'attente se prolonge, le béton ne pourra plus être utilisé que pour des travaux secondaires ou provisoires (remplissages, piste de chantier, etc.).

Mise en place et compactage

Moyens de mise en place	Consistance du béton				
	S1	S2	S3	S4	S5
Tapis roulant					
Benne					
Pompe					
Goulotte (jusqu'à 3m)					

Fig. 2.5.1
Moyens de mise en place utilisables en fonction de la consistance

Transbordements et mise en place

Le figure 2.5.1 indique les principaux moyens de transbordement qui peuvent être utilisés, en fonction de la consistance et des particularités du chantier.

Le volume de la livraison et les moyens de mise en œuvre doivent être adaptés l'un à l'autre. La mise en place du béton doit s'opérer à un rythme constant, en couches horizontales d'épaisseur aussi régulière que possible. Pour éviter la ségrégation, la hauteur de chute doit être au maximum de 50 à 70 cm. Si cette hauteur dépasse 2 m, le béton devrait être mis en place à l'aide d'un tube ou d'un flexible.

Compactage

Un compactage soigneux est essentiel pour la durabilité du béton. Les avantages d'un béton bien compacté sont les suivants :

- Etanchéité plus élevée
- Meilleure durabilité
- Résistance élevée à la compression
- Meilleure adhérence du béton aux armatures

Méthodes de compactage

Le choix de la méthode de compactage dépend de la consistance du béton. La méthode la plus utilisée et la plus efficace est la vibration qui s'effectue au moyen d'aiguilles vibrantes (fig. 2.5.2), de vibrateurs de coffrage ou de règles vibrantes. On recourt fréquemment à une combinaison de ces méthodes. La vibration réduit fortement le frottement interne entre les granulats. Les grains se rapprochent, l'air remonte à la surface et les vides sont remplis par la pâte de ciment. Il reste cependant toujours dans la masse une quantité d'air résiduel que l'on appelle «air occlus» et qui se situe généralement autour de 1,5 % du volume de béton.



Fig. 2.5.2
Compactage du béton à l'aiguille vibrante

Mise en place et compactage

Domaine d'application des vibrateurs à aiguille à haute fréquence (Fig 2.5.3) :
L'expérience a montré que la fréquence de 12'000 t/min est la plus favorable pour l'ensemble des bétons courants. Pour les bétons à granulométrie fine, cette fréquence doit être augmentée (jusqu'à 18'000 t/min).

Fig. 2.5.3
Valeurs pratiques de la zone d'efficacité et de l'espacement des points de compactage pour différents diamètres d'aiguilles vibrantes

Diamètre de l'aiguille [mm]	Diamètre de la zone d'efficacité [cm]	Espacement des points de compactage [cm]
< 40	30	25
40 à 60	50	40
> 60	80	70

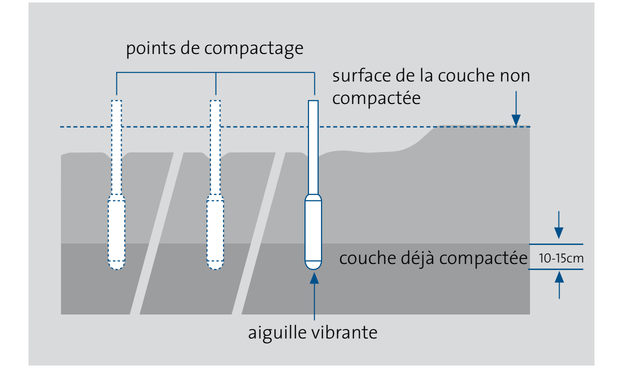


Fig. 2.5.4
Mise en place par couches et espacement des points de compactage



Fig. 2.5.5
Mise en œuvre d'un béton à la benne munie d'un tube plongeur

Les règles d'un bon compactage

- Vibrer le béton par couches d'épaisseur de 30 à 50 cm.
- L' aiguille vibrante doit être introduite dans le béton rapidement et à intervalles réguliers. Elle doit être maintenue brièvement au point le plus bas, remontée lentement, et enfin retirée de manière que la surface se referme d'elle-même. Si la surface ne se referme pas, cela peut signifier que la consistance du béton est trop raide, que la prise a déjà commencé, ou encore que la durée de vibration est insuffisante.
- Le béton ne doit pas être réparti au moyen de l'aiguille vibrante.
- Choisir l'espacement des points de compactage de telle manière que les zones d'action du vibrateur se recouvrent légèrement (fig 2.5.3).
- Arrêter la vibration dès qu'une fine couche de laitance apparaît en surface et que les grosses bulles d'air ne remontent plus que sporadiquement.
- Lorsque le béton est mis en place par couches successives, l'aiguille vibrante doit pénétrer d'environ 10 à 15 cm dans la couche sous-jacente pour assurer la bonne liaison des deux couches (fig. 2.5.4).
- Eviter de toucher les armatures et autres éléments noyés avec l'aiguille.

Règle pratique
Espacement des points de compactage = 8 à 10 fois le diamètre de l'aiguille

Post-compactage (revibration)

En réintroduisant le vibrateur dans la masse déjà compactée du béton, mais avant la prise, la compacité peut encore être améliorée. Cette technique convient surtout pour les bétons dont le facteur E/C est élevé et qui ont tendance au ressuage, ou dont la mise en place a été difficile. Les vides créés par le tassement du béton frais sous les armatures horizontales peuvent ainsi être comblés. Une condition indispensable à la réussite du post-compactage est de le pratiquer au bon moment, alors que le béton est encore ouvrable. C'est la difficulté majeure de cette opération qui doit être exécutée par du personnel expérimenté.

Béton pompé

Domaine d'application

Le pompage s'est imposé comme moyen moderne et économique de mise en place du béton (fig 2.6.1). On peut pratiquement y recourir pour tous les types de travaux, mais cette technique est surtout utilisée lors de grandes étapes de bétonnage ou lorsque la zone de mise en place est difficile d'accès.
Les pompes à béton sont classées en deux grandes catégories : les pompes mobiles et les pompes stationnaires. Le tableau ci-dessous donne quelques indications sur leurs performances. Lorsque la distance de transport et/ou le volume de béton sont peu importants, on peut aussi recourir à un camion malaxeur pompe (fig 2.6.2).



Fig. 2.6.1
Mise en place du béton par pompage

Pompes mobiles et stationnaires	
Débit horaire	20 à 150 m^3
Distance de transport	Usuelle jusqu'à 500m Extrême jusqu'à 1200m
Hauteur de pompage	A la montée [1] jusqu'à 250 m A la descente [1] de cas en cas

1) Pour éviter la vidange inopinée des tuyaux de transport en cas de bourrage ou d'interruption du bétonnage, il est conseillé d'insérer des tiroirs d'arrêt au bas des tuyaux montants ou descendants. Au pied de chutes importantes une boucle de freinage peut également se révéler utile.

Exigences

Il convient d'observer certaines règles pour formuler un béton destiné à être pompé, afin que le béton frais présente toutes les propriétés nécessaires à sa mise en place au travers des tuyaux de pompage.
La formulation d'un béton pompé devrait donc toujours être confiée à un spécialiste expérimenté en technologie du béton.
Lors de la composition d'un béton pompé, il faut accorder un soin particulier au choix de la granularité, du dosage en ciment, tout en respectant les propriétés spécifiées pour le béton durci.
La pompe pulse le béton jusqu'au lieu de mise en place au travers d'une tuyauterie (Ø 100 ou 125 mm) dont le premier segment devrait toujours être rectiligne et horizontal. Le risque de ségrégation est le danger majeur pour le béton au cours de cette opération.

■ Ciment

Tout ciment conforme aux normes devrait convenir à la production de béton pompé, mais les ciments les plus appropriés sont ceux qui donnent une bonne cohésion au béton frais. Le dosage minimum permettant un transport aisé du béton au travers des tuyaux de distribution est de 320 kg/m^3.

■ Granulats

- Sable: la granularité du sable doit être continue. Des variations trop importantes et non maîtrisées de la granularité du sable sont souvent à l'origine de difficultés de pompage.

- Grâce aux progrès enregistrés dans la construction des pompes, la forme des graviers (roulés ou concassés) ne joue plus un rôle primordial sur l'aptitude au pompage. Les grains de forme arrondie et une granulométrie continue des sables sont toutefois préférables.

Béton pompé

- Ajouts
  La forme sphérique des particules de cendres volantes favorise l'aptitude au pompage du béton frais, et ce pour des dosages compris entre 20 et 50 kg/m³.

- Adjuvants
  Le recours aux adjuvants s'effectue selon les mêmes principes que pour le béton non pompé. En ce qui concerne l'usage des entraîneurs d'air, il faut toutefois mentionner qu'une teneur en air du béton frais supérieure à 4 % peut affecter les performances de la pompe.

- Consistance
  Pour être aisément pompable, le béton frais devrait avoir une consistance suffisamment plastique, soit un affaissement (slump) compris entre 100 et 250 mm.

Il arrive que la consistance du béton frais dépende fortement des propriétés du sable utilisé et qu'une série d'essais préliminaires soit nécessaire pour atteindre les valeurs désirées.

Conseils pour la mise en œuvre de béton pompé

Pour qu'une étape ou une opération de pompage se déroule sans friction, il est indispensable d'organiser suffisamment tôt un contact préparatoire entre l'entreprise de construction, l'entreprise de pompage et la centrale à béton.

- L'entreprise de pompage est responsable de l'installation et de l'exploitation de la pompe, alors que l'entreprise de construction est responsable de la mise en place du béton et de la cure.

- La fréquence des livraisons de béton et les performances de la pompe doivent être adaptées au rythme de l'équipe de bétonnage.

- Afin de réduire autant que possible le risque de ségrégation, la pompe doit être alimentée par camion malaxeur. Sur de très courtes distances, on peut toutefois admettre l'emploi de camions bennes.

- Le pompage est généralement amorcé par une «gâchée de lubrification» constituée de 0,5 à 2 m³ de mortier riche en ciment. Cette gâchée ne doit en aucun cas être utilisée pour du béton de structure.

Mesures de sécurité

La mise en place de béton pompé génère quelques risques spécifiques qu'il faut se garder de sous-évaluer. En particulier, il faut toujours vérifier si l'on a bien

- tenu compte de l'augmentation de la pression du béton sur les coffrages verticaux
- contrôlé qu'aucune ligne électrique aérienne ne se situait dans le champ de la flèche de distribution
- contrôlé la capacité portante de l'emplacement prévu pour la pompe et ses accessoires (mât de répartition, etc.)

De plus, les instructions données par le personnel affecté au service de la pompe doivent être respectées.



Fig. 2.6.2

Camion malaxeur équipé d'une pompe

Propriétés

Le béton autoplaçant, appelé aussi BAP se distingue des bétons ordinaires par :

- sa très grande fluidité, combinée à une importante stabilité (absence de ressuage)
- sa capacité à se mettre en œuvre sans vibration, la compaction s'effectuant par le seul effet gravitaire.

Le recours à un béton autoplaçant permet ainsi de simplifier le déroulement du chantier et comporte des avantages technologiques, comme le fait de pouvoir fabriquer des parties d'ouvrage complexes en une seule étape ou d'obtenir des bétons apparents d'un très bel aspect. Cette technologie permet de réduire le coût global des travaux et d'améliorer les conditions de travail.

Particularités techniques

Constituants du béton

Pâte

La quantité de pâte (eau + fines < 125 µm + adjuvants + air) nécessaire dans un béton autoplaçant est plus élevée que dans les bétons vibrés. Le rôle de la pâte est d'écarter les granulats et de diminuer les frottements entre eux, ce qui favorise l'étalement et l'aptitude au remplissage du béton.
D'une manière générale, la quantité de fines dans un BAP est de l'ordre de 500 kg/m^3.
Ces fines proviennent du ciment, des additions et des granulats. Pour éviter des problèmes d'élévation excessive de la température lors de l'hydratation, le liant est généralement un ciment composé (CEM II ou CEM III) ou un mélange de ciment et de cendre volante et/ou de filler calcaire.

L'obtention de la fluidité souhaitée des BAP se fait en utilisant des dosages importants de superplastifiant. Toutefois un dosage trop élevé peut augmenter la sensibilité du béton vis-à-vis de la ségrégation et du ressuage en cas de variations de teneur en eau.

Dans le cas de BAP ayant des rapports eau/fines élevés, les fines ne sont pas toujours suffisantes pour fixer l'eau dans le béton. On peut alors utiliser des agents de cohésion qui, comme les fines, ont pour rôle d'empêcher le ressuage et de limiter les risques de ségrégation des granulats en rendant la pâte plus épaisse.
Leur utilisation peut toutefois conduire, suivant les produits, à des problèmes de dosage en centrale (cas de dosages faibles), à des entraînements d'air excessifs et à une diminution de la fluidité.

Granulats

Il est possible d'utiliser des granulats concassés ou roulés pour la formulation des BAP.
Etant donné que les gravillons risquent de provoquer le blocage du béton en zone confinée, il faut en limiter le volume. D'un autre côté la présence de gravillons permet d'augmenter la compacité du squelette granulaire du béton et donc de limiter la quantité de liant nécessaire pour obtenir l'ouvrabilité et la résistance souhaitées. Ces considérations conduisent à adopter un rapport G/S proche de 1 dans les BAP.
En général le diamètre maximal Dmax des gravillons dans un BAP est compris entre 10 et 20 mm. Le choix d'un Dmax plus important est possible mais ne se justifie que lorsque le confinement est faible.

Etant donné la proportion élevée de sable, il est particulièrement important de mesurer le taux d'humidité de cette classe granulaire et d'en tenir compte, sans quoi il est impossible de garantir les propriétés attendues du béton frais.

Propriétés du béton frais

En raison des particularités à l'état frais du béton autoplaçant, sa consistance ne peut être mesurée à l'aide des méthodes d'essai usuelles.
De nombreux essais ont été développés pour tenter de caractériser les propriétés du BAP. Jusqu'à présent, aucun n'a obtenu l'approbation générale, de même, aucun ne permet de caractériser tous les aspects significatifs de l'ouvrabilité des BAP.

Béton autoplaçant




Fig. 2.7.1
Mesure du slumpflow





Fig. 2.7.2
Essai de la boîte en L




Fig. 2.7.3
Essai V Funnel



Fig. 2.7.4
Essai au tamis

Méthode	Propriété
Slumpflow	Aptitude à l'étalement et au remplissage en milieu non confiné
V-funnel	Aptitude à l'écoulement et au remplissage en milieu non confiné
V-funnel à T15 minutes	Résistance à la ségrégation
Essais au tamis	Résistance à la ségrégation
Boîte en L	Aptitude à l'étalement et au remplissage en milieu confiné
Boîte en U	Aptitude à l'étalement et au remplissage en milieu confiné

Les essais principalement utilisés en Belgique sont :

Slumpflow
L'essai consiste à mesurer l'étalement du béton, sur une plaque, sans obstacle (fig 2.7.1).

Boîte en L (ou en U)
L'essai consiste à observer et à mesurer l'aptitude à l'étalement et au remplissage du béton au travers d'obstacles constitués de barres d'armatures (fig 2.7.2).

V Funnel
L'essai consiste à observer et à mesurer l'aptitude à l'écoulement du béton au travers d'un orifice étroit (fig 2.7.3). Réitéré après 15 min de repos dans le moule, cet essai permet d'apprécier la résistance à la ségrégation du béton.

Essai au tamis
L'essai consiste à mesurer la capacité du béton, versé sur un tamis, à maintenir sa cohésion (fig 2.7.4).

Fabrication, transport et mise en place

La fabrication, le transport et la mise en place du BAP se font avec le matériel habituellement utilisé pour les bétons ordinaires.

Néanmoins, les formules BAP étant en général plus pointues que celles des bétons ordinaires, la formulation d'une composition adaptée à l'usage prévu nécessite des connaissances approfondies en technologie du béton.

Béton autoplaçant

L'équipement des centrales à béton devra idéalement comprendre des stockages des granulats à l'abri de la pluie et un système fiable d'évaluation de l'humidité de chacune des coupures.

Le malaxeur devra avoir un fort taux de cisaillement.
Il est recommandé de malaxer ces bétons le temps nécessaire à l'obtention d'une stabilisation complète du wattmètre.

Le béton autoplaçant peut être transporté comme n'importe quel béton. On portera une attention particulière à l'absence d'eau dans le camion avant chargement, la propreté de la toupie, le maintien de la toupie en rotation lente pour éviter la ségrégation du béton.

A l'arrivée sur le site un malaxage à grande vitesse pendant au minimum 1 minute est effectué juste avant déchargement.

Lors de la mise en place des BAP, on veillera particulièrement à l'étanchéité des coffrages.

La vitesse de mise en place du béton influe considérablement sur la qualité des parements. A cet égard, il convient notamment de faire en sorte que le béton s'écoule et se mette en place lentement dans le coffrage, afin qu'il ait suffisamment de temps pour se désaérer et éliminer de lui-même l'air excédentaire. Sinon, cet air risque de s'accumuler entre le béton et la peau du coffrage pour former des bulles d'air sur le parement.





Fig. 2.7.4
Le BAP a permis la réalisation sans difficultés de formes concaves sans reprises de bétonnage sur la hauteur et avec une belle finition

Béton autoplaçant



Fig. 2.7.5
Pompage du béton autoplaçant par le bas du coffrage



Fig. 2.7.6
Mise en place d'un béton autoplaçant sur une surface horizontale

La mise en place des BAP peut se faire par les méthodes usuelles :

- benne à manchette en haut de coffrage : on veillera à limiter la hauteur de chute à 5m, afin de garantir un aspect satisfaisant de parement.
- benne ou pompe avec tube plongeur : cette technique a l'avantage d'éviter la chute du béton frais dans le coffrage (fig 2.7.4 et 5).

Une technique particulière consiste à mettre le béton en place à la pompe par le bas du coffrage. Elle évite toute chute du béton, permettant d'obtenir un très bel aspect de parement et permet de supprimer les travaux en hauteur (fig 2.7.5).

Pour les applications horizontales, les BAP peuvent être mis en œuvre par déversement direct depuis la goulotte de la toupie, à la benne ou par pompage (fig 2.7.6). La finition de la surface est effectuée de préférence au moyen d'une barre dite de «débullage »(fig 2.7.7).



Fig. 2.7.7
Talochage de la surface supérieure à la barre de débullage

Des études ont montré que la pression exercée par les BAP sur les coffrages est égale à la pression hydrostatique lorsque la vitesse de montée du béton dans l'ouvrage est supérieure ou égale à 12 m/h.
Il est donc fortement recommandé de dimensionner les coffrages pour résister à la pression hydrostatique sauf si une étude particulière a été menée sur ce sujet.

Enfin, la cure du béton autoplaçant doit intervenir dès la fin de la mise en oeuvre (fig. 2.7.8), en raison de la quantité élevée de pâte et du faible rapport eau sur ciment, qui peuvent accroître et accélérer les effets du retrait.



Fig. 2.7.8
Vaporisation d'un produit de cure

Exemples d'utilisation

Le béton autoplaçant a déjà fait ses preuves dans de nombreuses réalisations. Ses domaines d'utilisation sont très variés, depuis la construction de villas, de bâtiments, ainsi que d'ouvrages de génie civil (béton de classe de résistance C25/30 à C45/55), à la préfabrication de piliers fortement chargés (C90/105).

Sa bonne fluidité et sa capacité à expulser de lui-même l'air excédentaire ont notamment permis de résoudre les problèmes liés au bétonnage d'éléments à très forte densité d'armatures ou de forme compliquée (fig 2.7.8). En outre, la qualité des surfaces brutes de décoffrage rend superflu les coûteux travaux de ragréage et de retouche, qui sont généralement nécessaires dans le cas de murs et piliers coulés avec du béton conventionnel et vibré.



Fig. 2.7.8

Le BAP a permis la réalisation sans difficultés des formes complexes en réduisant les étapes de bétonnage

Béton apparent



Fig. 2.8.1
Béton coloré coulé dans un coffrage matrice – Collège de Stains (France - 93)

On désigne par béton apparent toute surface de béton qui reste visible et doit donc satisfaire à des critères esthétiques plus stricts.
On distingue fondamentalement deux modes de réalisation de surfaces en béton apparent. Dans un cas, on utilise le coffrage comme élément de structuration de la surface. Dans l'autre, la surface est retravaillée après le décoffrage. Dans les deux cas, la pigmentation du béton peut être une caractéristique esthétique supplémentaire.

Facteurs influant sur l'état de surface du béton :
- type et matériau pour la peau du coffrage
- nombre d'utilisations et état de propreté du coffrage
- joints de travail (arrêts et reprises de bétonnage)
- rigidité du système de coffrage
- quantité et type d'huile de décoffrage
- composition et fabrication du béton
- mise en place et compactage du béton
- conditions météorologiques lors de la réalisation et de la cure

Pour obtenir des surfaces apparentes d'aspect régulier, l'état des coffrages, la composition et la fabrication du béton ainsi que sa mise en place doivent satisfaire à des critères extrêmement exigeants.

Constituants

Ciment

Tous les ciments conformes à la norme NBN EN 197-1 conviennent en principe à la fabrication de béton apparent. Comme la couleur du béton à la surface est influencée par celle du ciment, ainsi que par celle de la classe granulaire fine, il ne faudrait changer ni de type de ciment ni de centrale de béton prêt à l'emploi pendant l'exécution d'un ouvrage.

- Le ciment Portland (CEM I) produit des surfaces de béton d'un gris caractéristique.
- Le ciment blanc est un ciment ayant fait ses preuves dans la fabrication d'éléments en béton remplissant une fonction esthétique. Sa couleur blanche en fait également une excellente base pour la fabrication de bétons teintés.
- Le ciment de haut fourneau (CEM III) confère aux surfaces de béton une teinte nettement plus claire, après séchage, que le ciment Portland grâce au laitier de haut fourneau qu'il contient. Les taches typiques de couleur bleu-vert que l'on observe après le décoffrage disparaissent d'elles-mêmes après séchage.



Fig. 2.8.2
Gare RER EOLE à Paris, France



Fig. 2.8.3
Collège de Brunstatt (France – 68). Les façades en béton apparent ont été réalisées en béton autoplaçant

Eau
L'eau du réseau et les eaux décantées peuvent être utilisées pour la fabrication du béton apparent. En revanche, les eaux de lavage recyclées doivent être évitées en raison de leur influence possible sur la coloration et sur les autres propriétés du béton.

Granulats
Le béton apparent situé à l'extérieur doit résister au gel et aux intempéries, ce qui implique la sélection de granulats durs et non gélifs. La couleur du béton apparent est influencée non seulement par le ciment mais aussi par la couleur des classes granulaires fines. Lorsque la surface apparente est travaillée après décoffrage, la couleur des classes granulaires supérieures a aussi son importance. Par conséquent, il faut veiller à ne pas utiliser des granulats d'origine variant pendant la réalisation d'un ouvrage en béton apparent.

Adjuvants
Les plastifiants et superplastifiants permettent d'obtenir une consistance plus molle, et par là une meilleure ouvrabilité du béton, sans modifier le dosage en eau. Les adjuvants n'ont aucun effet direct significatif sur la couleur du béton apparent. Les adjuvants peuvent également être utilisés pour réduire le rapport E/C tout en maintenant une consistance donnée, ce qui permet d'améliorer maintes propriétés du béton durci, mais modifie aussi légèrement la teinte des surfaces du béton. En effet, un béton contenant plus d'eau aura une teinte plus claire après durcissement.



Fig. 2.8.4
Béton photogravé

Béton apparent

Ajouts

Les principaux ajouts utilisés dans la formulation des bétons apparents sont le filler minéral et les pigments, qui servent à teinter le béton.



Fig. 2.8.5
Plafond du musée du Louvre

Composition du béton

L'expérience a montré qu'il s'avère judicieux de ne pas abaisser le dosage en ciment des bétons apparents au-dessous de 350 kg/m^3, dans le cas de granulats d'une dimension maximale de 32 mm.

En outre, le rapport E/C doit être absolument le même pour toutes les gâchées, car une variation de +/- 0,02 de ce rapport entraîne déjà des différences de teinte visibles à l'œil nu sur des surfaces lisses. Le rapport E/C devrait être choisi le plus bas possible afin de limiter les remontées d'eau.

La teneur en fines (comprenant le ciment, les éléments fins des granulats ainsi qu'éventuellement les additions de dimension inférieure ou égale à 0,125 mm) doit au moins atteindre les valeurs indiquées à la figure 1.3.6 (voir chapitre granulats). La granularité doit être continue.

Consistance

Une consistance adéquate constitue une condition indispensable à la fabrication du béton apparent. Les classes de consistance S2 et S3 sont appropriées afin d'assurer l'enrobage complet des armatures.

Exécution

Le premier point à relever est que le rapport E/C doit être le même pour chacune des gâchées, quel que soit le taux d'humidité des granulats. En outre, la durée de malaxage du béton apparent devrait si possible être toujours identique (au moins 50 secondes). La température du béton frais, qui influence la réactivité du ciment, devrait également être la même, car une différence de vitesse d'hydratation peut entraîner des différences de couleur.

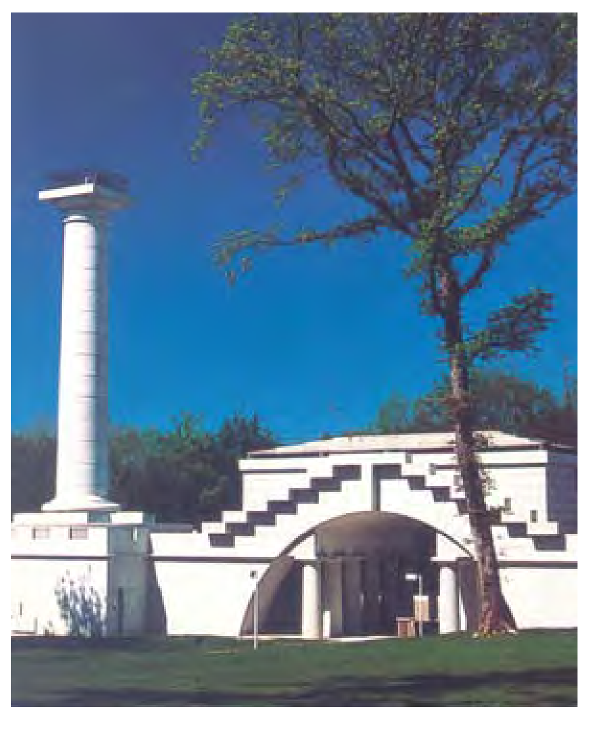


Fig. 2.8.6
Aire du Jura, autoroute A39, France



Fig. 2.8.7
Escalier en béton imprimé

Le compactage doit être réalisé de manière régulière et par petites couches.
Au moment du décoffrage du béton apparent, il faut s'assurer que tous les éléments sont restés coffrés pendant une même durée (compris entre 2 et 5 jours). En outre, chaque partie d'ouvrage devrait être décoffrée en une fois.

Une attention particulière doit être accordée à la cure des bétons. Le ciment a besoin d'eau pour assurer son hydratation complète. Or l'eau engendre une décoloration des surfaces de béton au jeune âge en perturbant le processus de transformation de la chaux hydratée en carbonate de calcium. Ce carbonate de calcium forme à la surface une couche insoluble et claire que l'on appelle efflorescence.
Dans le cas d'un béton apparent, ce phénomène est hautement indésirable. Il faut donc créer un espace humide au voisinage d'une surface de béton apparent. L'air ne doit pas pouvoir y circuler et l'eau ne pas pouvoir s'y accumuler. On peut créer un tel espace en suspendant un rideau de plastique à une certaine distance de la surface apparente ou en enveloppant le béton dans un géotextile. De la sorte, on crée un environnement dans lequel règne une hygrométrie dépassant 80%, ce qui garantit une bonne hydratation du ciment également à la surface du béton.
Il faut cependant veiller à ce que le plastique ne touche pas le béton, sans quoi des efflorescences apparaîtront inévitablement. En outre, il ne faut en aucun cas qu'un tirage (effet cheminée) ne se crée entre le plastique et le béton.
D'une manière générale, les conditions météorologiques au moment de la mise en place du béton jouent un rôle plus important pour le béton apparent que pour les autres bétons. L'hydratation du ciment est une réaction chimique qui est plus rapide lorsque les températures sont élevées et qui ralentit lorsqu'elles sont basses. Le degré d'hydratation est en outre aussi fonction de l'humidité ambiante. Ainsi, le béton n'aura pas la même couleur s'il s'hydrate pendant une période froide et sèche ou, au contraire, chaude et humide. Les variations d'humidité de l'air influencent également l'humidité de la peau du coffrage, ce qui se traduit par des variations de couleur de la surface du béton.
Toutes ces raisons font que le temps qu'il fait n'est pas sans importance pour la réalisation d'un ouvrage en béton apparent.
Les murs en béton apparent ne devraient pas être décoffrés avant ou pendant de fortes précipitations, et ils ne doivent en aucun cas être aspergés d'eau juste après avoir été décoffrés. Le rythme du décoffrage doit également être choisi en sorte que tous les éléments restent coffrés pendant une même durée. A cet égard, il faut également prendre en compte les congés de fin de semaine et les jours fériés.

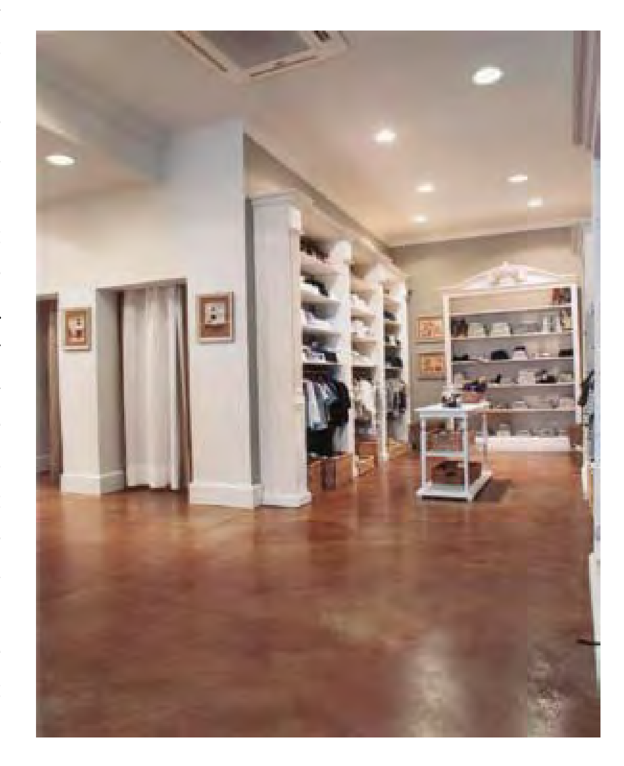


Fig. 2.8.8
Sol en béton ciré

Cure



Fig. 2.9.1
Cure par couverture plastique

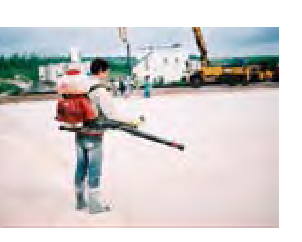


Fig. 2.9.2
Vaporisation d'un produit de cure

Buts de la cure du béton

On entend par «cure» l'ensemble des mesures qu'il faut prendre pour protéger le béton depuis sa mise en place jusqu'au développement d'une résistance suffisante, dans le but d'en améliorer la qualité.

Un des risques majeurs pour le béton au jeune âge est la dessiccation précoce, qui commence en surface, se poursuit en profondeur et ne permet pas une bonne hydratation de la pâte de ciment. Or, c'est surtout dans les zones proches de la surface que la pâte de ciment doit présenter une densité élevée et une porosité minimale. Elle peut ainsi opposer une bonne résistance aux agressions extérieures et stopper la carbonatation avant qu'elle n'ait atteint les armatures. C'est aussi le premier résultat visé par la cure.

La cure doit protéger le béton contre :

- la dessiccation prématurée provoquée par le vent, le soleil, le froid sec
- les températures extrêmes (chaud/froid) et les variations de températures
- les intempéries
- l'action prématurée de substances nocives (huiles, etc...).

Dessiccation précoce

Il est important que les mesures prises contre la dessiccation précoce soient appliquées dès la mise en place du béton, car les effets d'une perte d'eau prématurée à la surface du béton (béton d'enrobage) sont hautement indésirables :

- apparition rapide de fissures de retrait importantes (voir chap. 3.2 sur la fissuration)
- perte de résistance
- tendance au farinage de surface
- réduction de l'étanchéité et de la durabilité
- diminution de la résistance à l'abrasion

En raison de leurs mécanismes d'hydratation spécifiques, les ciments à forte proportion de laitier (type CEM III ou ciment sursulfaté) sont particulièrement sensibles à la dessiccation précoce. Par conséquent, il est indispensable de respecter, pour les bétons réalisés avec ces ciments, les mesures à prendre pour la cure.



Fig. 2.9.3
Un produit de cure coloré permet de mieux contrôler l'application

Mesures à prendre contre la dessiccation précoce du béton :

- maintenir les coffrages en place
- couvrir avec des feuilles plastiques (fig. 2.9.1)
- couvrir avec des bâches thermiques
- poser des protections qui maintiennent l'humidité (jute, nattes géotextiles)
- vaporiser un agent de cure (fig. 2.9.2 et 2.9.3)
- arroser la surface du béton (en continu lors des grandes chaleurs)
- conserver les éléments sous l'eau
- combiner plusieurs de ces mesures

Vitesse de dessiccation

La vitesse de dessiccation dépend des facteurs suivants :

- température de l'air
- humidité relative de l'air
- température du béton
- vitesse du vent

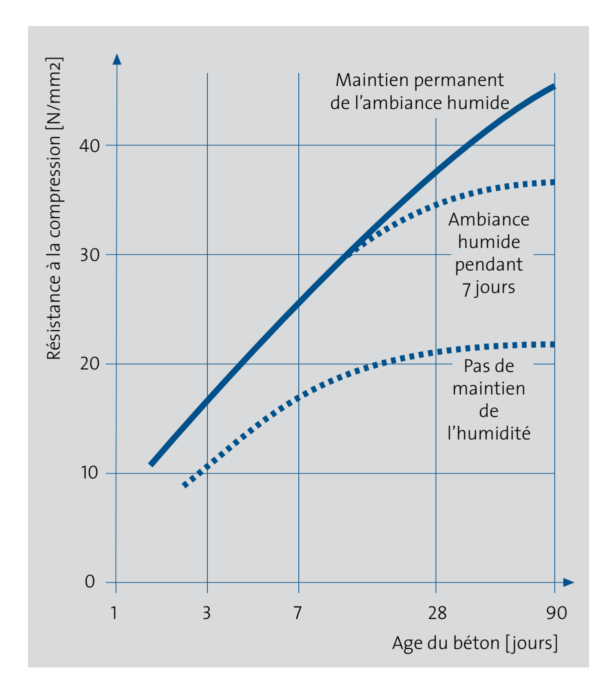


Fig. 2.9.4

Effet du maintien d'une ambiance humide sur la montée en résistance du béton au voisinage de la surface

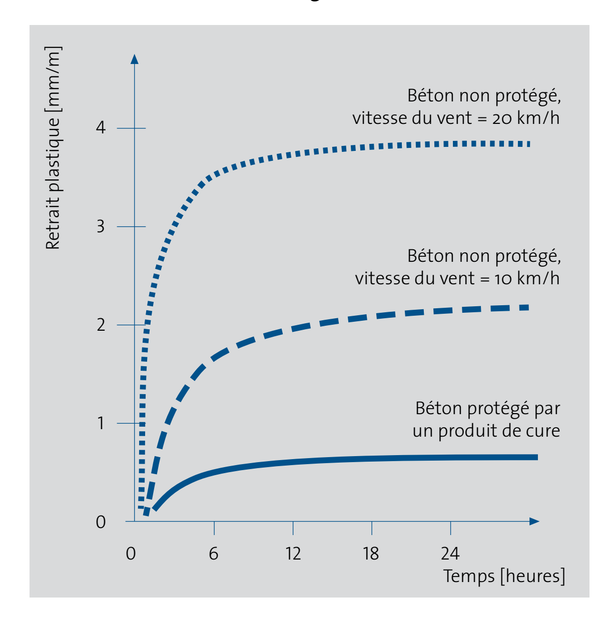


Fig. 2.9.5

Conséquence de conditions météorologiques défavorables sur le retrait au jeune âge, en présence et en l'absence de cure

Les figures 2.9.4 et 2.9.5 illustrent l'action de ces différents paramètres et l'influence favorable de la cure.

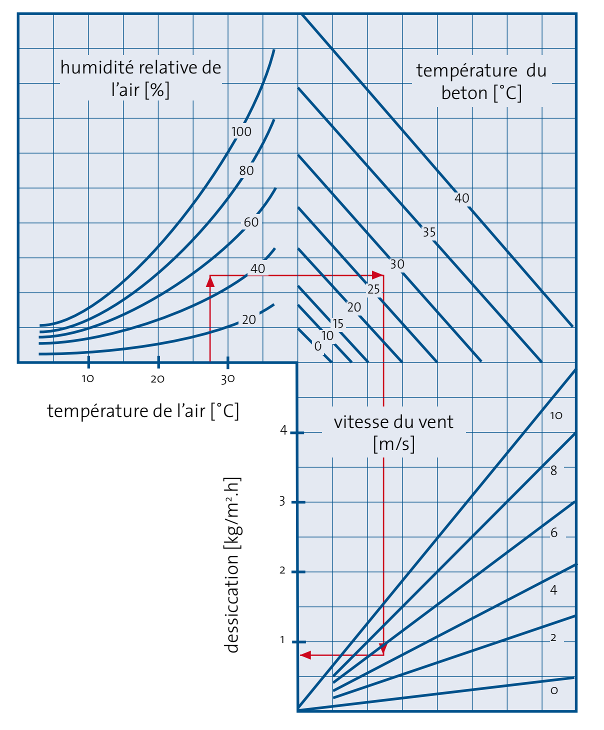


Fig. 2.9.6

Nomogramme permettant d'estimer la dessiccation d'une surface de béton horizontale non couverte

Exemple :

T° de l'air 28°C

HR de l'air 50%

T° du béton 28°C

vit vent 5m/s

Résultat :

taux de dessication = 0,8 kg/m².h

La figure 2.9.6 permet d'estimer le taux horaire de dessiccation d'une surface de béton non couverte en tenant compte de l'ensemble des facteurs mentionnés ci-dessus. Il y a un risque élevé de fissuration dès que l'évaporation d'eau est supérieure à 1 kg/m².h. En deçà de 0.5 kg/m².h, le risque d'apparition de fissures est faible.

Différences extrêmes de température

Le béton se dilate à la chaleur et se contracte sous l'effet du froid. Lorsque ces déformations d'origine thermique sont empêchées, ou dans le cas de grandes différences de température, il peut se former des tensions internes. Si ces tensions sont plus grandes que la résistance à la traction du béton au jeune âge, il y aura fissuration. Il faut donc veiller à éviter les différences importantes de température entre le cœur et la surface d'un béton encore insuffisamment durci.

Les mesures à prendre en fonction de la température extérieure sont reprises au tableau 2.9.1.
D'autres mesures visant à les éviter ou à diminuer leurs effets sont décrites au chapitre 3.2, qui traite de la fissuration.

Cure

Mesures à prendre pour la cure

La méthode appliquée et la durée de la cure dépendent essentiellement de l'environnement immédiat et du type de béton. La norme expérimentale NBN ENV 13670-1 (exécution des ouvrages en béton) contient des informations sur la durée de cure.

Conseil pratique
Pour éviter que la vaporisation d'un produit de cure ne nuise à l'accrochage de la couche qui sera appliquée par-dessus, la surface du béton devra être traitée après la fin de la cure (sablage ou ponçage, par exemple) si besoin.

Intempéries

Suivant leur intensité, les précipitations et autres intempéries peuvent altérer – souvent définitivement – les propriétés du béton frais et du béton durci : porosité élevée, durabilité réduite, lessivage. En cas de gel, les délais de décoffrage doivent être prolongés du nombre de jours pendant lesquels il a gelé.

Tableau 2.9.1
Mesures de cure à prendre en fonction de la température extérieure

Mesures	Température extérieure en °C				
	Au-dessous de - 3	De - 3 à + 5	De + 5 à + 10	De + 10 à + 25	Au-dessus de + 25
Recouvrir les surfaces exposées, appliquer un produit de cure ou maintenir l'humidité par arrosage continu. Surfaces coffrées : maintenir l'humidité des coffrages en bois, protéger les coffrages métalliques contre l'ensoleillement direct.				●	●
Recouvrir les surfaces exposées ou appliquer un produit de cure			●	●	
Recouvrir les surfaces exposées ou appliquer un produit de cure. Protection thermique nécessaire. Surfaces coffrées : appliquer une protection thermique.		●			
Envelopper les surfaces exposées et chauffer ou appliquer une protection thermique. La température du béton doit être maintenue au dessus de +10 °C pendant au moins 3 jours.	●				

Influence du coffrage

Le coffrage contribue pour une bonne part à la réussite d'une construction. Il conditionne l'aspect de la surface, sa structure et sa teinte (fig. 2.10.1). Il donne au béton sa dimension architecturale. Et pourtant il arrive qu'on ne lui accorde pas toute l'attention qu'il mériterait.

Choix du coffrage

Le choix du coffrage incombe en principe à l'entreprise d'exécution, sur la base des critères suivants :

- Type d'ouvrage ou d'élément
- Qualité de la surface du béton
- Nombre de réemplois possibles
- Difficulté du montage
- Capacité d'isolation thermique
- Prix

Matériaux de coffrage

- Lames brutes, rabotées ou non
- Panneaux de bois traités
- Panneaux stratifiés (marine)
- Coffrages plastifiés (polyester, polystyrène, linoléum, élastomères, etc.)
- Coffrages métalliques

Exigences générales relatives au coffrage

- Dimensions précises
- Etanchéité (fig. 2.10.2)
- Rigidité, absence de déformations (fig. 2.10.3)
- Propreté
- Faible adhérence au béton durci
- Esthétique de la structure de surface (fig. 2.10.4 et 2.10.5)



Fig. 2.10.1
Exemple d'essai sur différents coffrages et utilisation de différents produits de démoulage. Le même béton a été coulé pour chaque partie



Fig. 2.10.2
Effet d'une étanchéité insuffisante des joints de coffrage



Fig. 2.10.3
Manque de rigidité du coffrage et des réservations lors du coulage d'un béton fluide



Fig. 2.10.4
Surface bien réussie d'un béton ayant été coffré avec des planches de bois

Influence du coffrage

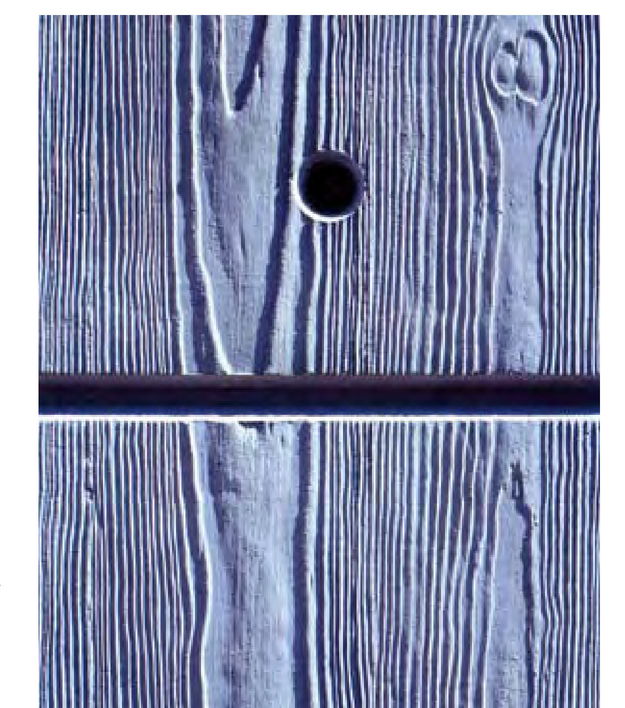


Fig. 2.10.5
Exemple d'une surface de béton structurée bien réussie



Fig. 2.10.6
Absence de produits de démoulage à certains endroits ayant entraîné l'arrachement du béton lors du décoffrage



Fig. 2.10.7
Différences de teinte d'un parement en béton dues à une mauvaise répartition de l'agent de démoulage

Types de coffrages

D'une manière générale, plus les coffrages sont absorbants, plus ils donnent une surface lisse et fermée, du fait qu'ils absorbent, au moins partiellement, l'excédent d'eau et les bulles d'air du béton fraîchement mis en place.

On ne devrait utiliser, pour une surface apparente donnée, que des panneaux de bois ayant le même nombre de réutilisations. En effet, le pouvoir absorbant du bois diminue à chaque mise en œuvre et affecte la surface du béton de nuances différentes. Les planches brutes devraient toujours être saturées de laitance de ciment avant le premier emploi. On uniformiserait ainsi plus ou moins les inégalités du bois et on éliminerait aussi les sucres qu'il contient, lesquels perturbent la prise et l'hydratation du ciment. Les coffrages non absorbants, hydrofuges, favorisent localement des concentrations de fines (micro-ségrégations) et une élévation du rapport E/C. Il s'ensuit des irrégularités de teinte à la surface du béton («nuages»). Des ségrégations superficielles plus importantes peuvent se traduire par une perte de durabilité (voir chap. 3.1, ségrégation du béton). Pour les éléments visibles, il est souvent favorable d'utiliser des coffrages absorbants ou munis d'une couche drainante, en fibres de polypropylène par exemple.

Produits de décoffrage

Les produits (ou agents) de décoffrage sont utilisés pour décoller sans difficulté le coffrage de la surface du béton, tout en les conservant intacts l'un et l'autre (fig. 2.10.6).

Ils doivent être appliqués soigneusement en couche mince et régulière avant la pose des armatures. Le produit en excès doit être éliminé au moyen d'un chiffon (fig. 2.10.7).

L'apparition de taches ou de différentes nuances de gris à la surface du béton est souvent le fait d'une application incorrecte du produit de décoffrage.

Bétonnage par temps chaud

Pendant les mois d'été on constate souvent une baisse de l'ordre de quelques N/mm² sur la moyenne des résistances à 28 jours. C'est le «creux» de l'été.

Il s'agit d'un phénomène connu, propre à toutes les régions où l'on observe des différences importantes entre les températures saisonnières. Les causes principales sont au nombre de trois :

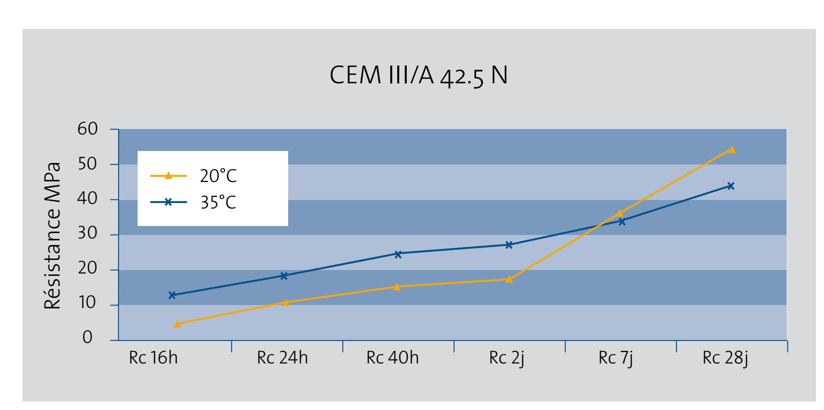
Température plus élevée du béton

D'une manière générale, plus la température du béton est élevée, plus le processus d'hydratation est accéléré car le développement des cristaux en forme d'aiguilles est plus rapide. Il s'ensuit tout naturellement un accroissement des résistances initiales. Ces aiguilles sont toutefois plus petites que celles qui se développeraient à une température moins élevée. Elles ont donc moins tendance à s'enchevêtrer, et il en résulte une plus grande porosité. Comme la résistance finale du béton dépend de cet enchevêtrement de cristaux et de la porosité, il est logique d'observer des valeurs moins élevées à long terme et ce quel que soit le type de ciment (fig. 2.11.1).

Rajout d'eau non autorisé

Lors de températures élevées, on constate généralement une diminution plus rapide de l'ouvrabilité du béton, voire même un raidissement précoce, qui rendrait plus difficile sa mise en place. Il n'est pas toujours possible de compenser complètement ce phénomène par une augmentation du dosage en plastifiant. Bien qu'il soit recommandé de ne pas rajouter d'eau au béton sur le chantier, la tentation est donc grande de rendre le béton plus ouvrable en y ajoutant de l'eau. Or comme tout apport d'eau (si petit soit-il) augmente le facteur E/C, il en résulte inévitablement une perte de résistance et plus encore de durabilité du béton.

Règle pratique
L'ajout de 10 litres d'eau par m³ de béton entraîne une perte d'environ 10 % sur la résistance à 28 jours.



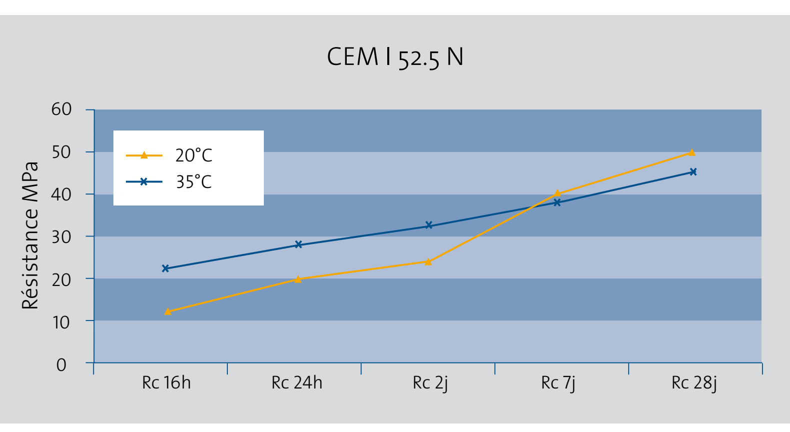


Fig. 2.11.1
Influence de température élevée sur la résistance à la compression. Le béton confectionné à 35°c a été maintenu 48h à cette température, puis conservé à 20°c

Bétonnage par temps chaud

Manque d'homogénéité du mélange

Dans le cas particulier où une grande différence de température existe entre les constituants du béton et l'eau de gâchage en provenance du réseau (froide même en été) on peut observer une répartition irrégulière du ciment dans le mélange. Il peut en résulter une légère baisse des résistances.

Afin de maintenir dans des limites acceptables les pertes de résistance par temps chaud, le béton frais ne devrait pas dépasser une température maximale de 30° C. Pour un béton à performances particulières, cette température ne devrait pas dépasser 25° C.

En plus de la perte de résistance à long terme (fig. 2.11.1) et de durabilité, une température élevée du béton peut encore être la cause d'autres effets indésirables :

- L'hydratation plus rapide du ciment se traduit par une perte d'ouvrabilité prématurée qui peut aller jusqu'au raidissement du béton, et parfois même rendre la mise en place quasi impossible (voir également le chap. 2.3 sur l'ouvrabilité et la consistance).
- D'autre part, le béton subit une dessiccation plus rapide en surface. Le phénomène est encore aggravé en présence de vent (même faible), d'ensoleillement direct et par faible humidité ambiante. La cure du béton (voir chap. 2.9) pourra limiter la perte d'humidité : toutefois, si l'on procède par arrosage, il faudra que ce soit en continu pour éviter les chocs thermiques en surface. A défaut de ces mesures, l'hydratation du ciment demeurera incomplète. La résistance finale et la durabilité des parties d'ouvrage (avant tout les surfaces) qui auront séchés trop vite seront diminuées. Ces éléments auront une tendance marquée au retrait plastique et à la fissuration qui en découle (voir chap. 3.2 sur la fissuration). Les bétons apparents pourront présenter des différences de gris inesthétiques.

Mesures à prendre en vue de maîtriser la température du béton

La température « Tb » du béton frais peut être évaluée au moyen de la formule simplifiée ci-dessous :

$$Tb = \frac{(Cc . C . Tc) + (Ce . E . Te) + (Cg . G . Tg)}{Cc . C + Ce . E + Cg . G}$$

Tb : Température du béton frais
Cc, Ce, Cg: Chaleurs massiques du ciment (0.2 cal.g-1.°C-1), de l'eau (1), des granulats (0.2)
C, E, G : Masse de ciment, d'eau, de granulats
Te, Tc, Tg : Températures de l'eau, du ciment, des granulats.

Prenons une formule de béton standard, dont la composition est la suivante :
- Ciment : 350 kg
- Eau 175 litres
- Granulats : 1800 kg

Le tableau suivant donne les températures de béton (en rouge) obtenues à partir de températures de ciment (en abscisse en bleu) et de granulats (en ordonnées en vert) variables. On suppose que la température de l'eau reste constante à 20 °C, mais on pourra vérifier avec la formule l'influence de la température de l'eau sur celle du mélange final.

	20	30	40	50	60	70
20	20		22		25	
30		27		29		32
40	32		34		37	
50		39		41		44
60	43		46		48	
70		51		53		56

Le calcul montre que pour obtenir une même augmentation de température de 6°C sur le béton frais, il faudrait, toutes choses égales par ailleurs, augmenter de:
- 50°C la température du ciment ou de
- 20°C la température de l'eau ou de
- 10°C la température des granulats.

En résumé, la température du béton frais est 5 fois plus sensible à la température initiale des granulats qu'à celle du ciment.

Bétonnage par temps chaud

Mesures propres à diminuer la température du béton

- Equiper les silos à gravier d'une isolation thermique
- Refroidir le gravier par arrosage [1]
  Il est vivement déconseillé d'utiliser des granulats chauds, exposés au soleil par exemple, pour confectionner des bétons durant l'été. La température des granulats peut monter jusqu'à 50°C, voire plus à la surface des piles de stockage. Il est recommandé d'utiliser les granulats de préférence le matin après refroidissement nocturne ou de les refroidir au préalable.
- Réfrigérer l'eau de gâchage avec de la glace [1]
- Dans certains cas particuliers, et sous le contrôle de spécialistes, on peut aussi rafraîchir le béton avec de l'azote liquide

1) Le dosage en eau doit être réduit d'autant.

Mise en place et compactage

- Des attentes réduites au minimum et une mise en place rapide du béton sont essentielles.
- Le personnel du chantier doit être informé et conscient des particularités et des exigences du bétonnage par temps chaud.
- Si l'on ne peut éviter des attentes imprévues, le béton qui se trouve dans les camions ou dans la trémie doit être protégé du vent et du soleil. Les camions malaxeurs peuvent être arrosés extérieurement afin de rafraîchir le béton se trouvant à l'intérieur de la toupie.
- Il faut interdire strictement tout ajout d'eau sur chantier.

Le bétonnage par temps chaud exige une bonne planification et une préparation minutieuse

- Coordonner méticuleusement la livraison et la mise en œuvre du béton frais afin d'éviter toute attente.
- Prévoir suffisamment d'engins et de personnel pour le bétonnage, afin d'exécuter la mise en place et le compactage du béton sans interruption.
- Les fonds et le coffrage ne doivent pas absorber l'eau du béton frais. C'est pourquoi le coffrage doit être arrosé avant la mise en place du béton. Eviter toutefois un arrosage exagéré laissant des flaques d'eau résiduelle.
- Si les conditions requises pour un bétonnage correct par temps chaud ne peuvent être remplies, quelles qu'en soient les raisons, il faut reporter l'opération à un moment où la température sera moins élevée.
- Dans une certaine mesure, l'emploi de retardateurs de prise permet de pallier aux inconvénients d'une hydratation trop rapide du ciment. Les retardateurs ont cependant peu d'influence sur le raidissement précoce du béton et ils exigent en outre une cure prolongée. En l'absence d'essais récents d'un retardateur donné sur un ciment donné, il faudra impérativement procéder à des essais préliminaires afin de déterminer le dosage approprié de l'adjuvant.



Fig. 2.11.2
Protection du béton contre la dessiccation

Bétonnage par temps chaud

Cure du béton : les heures qui suivent la mise en place sont déterminantes

- Une cure appliquée immédiatement et maintenue le temps nécessaire évite la dessiccation, réduit le risque de fissuration et augmente l'étanchéité et la résistance à la compression.
- La cure doit commencer immédiatement après la mise en place du béton (fig. 2.11.3).
- La cure doit être maintenue pendant plusieurs jours. Des indications de durée par rapport aux critères déterminants (type de ciment, rapport E/C, exposition) se trouvent dans la norme NBN ENV 13670-1.
- Les méthodes de cure, produits de cure et autres systèmes de protection sont décrits au chapitre 2.9.« cure »



Fig. 2.11.3
Vaporisation d'un produit de cure immédiatement après le bétonnage

Bétonnage par temps froid

Risques inhérents aux basses températures

La figure 2.12.1 met en évidence l'effet ralentisseur des basses températures sur la montée en résistance du béton. Très net au jeune âge, ce ralentissement est encore sensible à 90 jours. Par temps froid, certaines précautions s'avèrent donc indispensables pour la confection et la mise en œuvre du béton.

La norme NBN EN 206-1 précise que la température du béton frais ne doit pas être inférieure à 5°C au moment de la livraison.

Lorsque la température du béton descend en dessous de 0 °C, le développement des résistances est pratiquement stoppé. Si l'eau intérieure gèle dans un béton au jeune âge, elle peut en faire éclater la texture ou même le disloquer par expansion de la glace. Un béton ayant subi un tel dommage doit être éliminé.

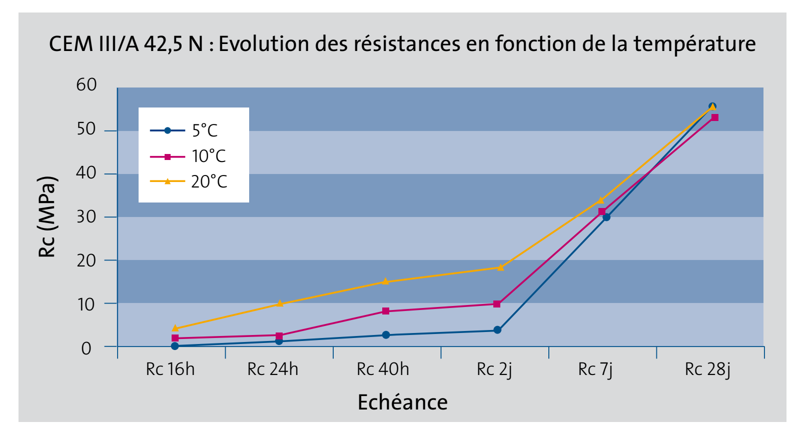
Pour des travaux de bétonnage au-dessous de -3 °C, il faut veiller à ce que la température du béton frais soit d'au moins +5 °C à la mise en place.

En règle générale, on considère que le béton peut supporter le gel dès que sa résistance à la compression dépasse 5 N/mm².

Mesures à prendre pour la fabrication du béton par temps froid

Par temps froid, les mesures suivantes, prises au stade de la fabrication, peuvent améliorer le développement des résistances et l'évolution de la température du béton :

- Elever la température du béton frais en préchauffant l'eau de gâchage et/ou les granulats.
- Augmenter le dosage en ciment et/ou choisir un ciment plus nerveux sans modifier les autres composantes du mélange, ce qui favorisera la montée en résistance au jeune âge (fig 2.12.2).
- Abaisser le rapport E/C par l'emploi d'un superplastifiant, car moins un béton contient d'eau, moins il est sensible au gel et plus vite il monte en résistance.
- Accélérer le développement des résistances par l'introduction d'un accélérateur (non chloré) de prise et de durcissement.



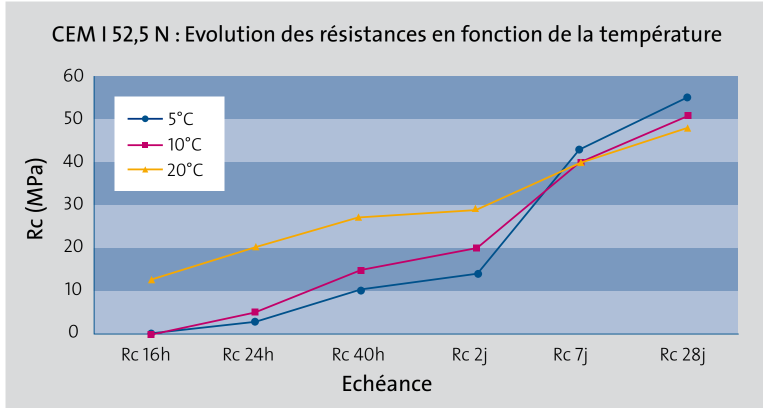


Fig. 2.12.1

Influence des températures basses sur les résistances à la compression. Exemple sur un béton à 300 kg de ciment. Les bétons sont conservés 48 h à la température de confection, puis à 20°c.

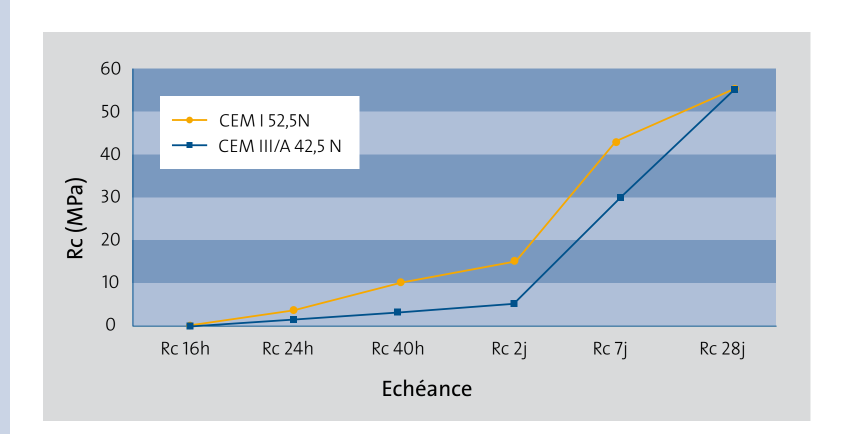


Fig. 2.12.2

Comparatif de la réactivité d'un CEM I 52,5 N et d'un CEM III/A 42,5 N à 5°C

Bétonnage par temps froid

Mesures permettant d'augmenter la température du béton frais

Afin que la température du béton frais ne soit pas trop basse lors du bétonnage, on peut réchauffer les constituants, ou tout au moins maintenir le ciment et les granulats à une température supérieure à la température extérieure.

En appliquant la formule de la page 62, on peut établir le tableau suivant donnant les températures de béton frais (en rouge) obtenues à partir des températures de l'eau de gâchage (en abscisse en bleu) et des granulats (en ordonnées en vert) variables. On suppose que la température du ciment reste constante à 20 °C, mais on pourra vérifier avec la formule l'influence de la température du ciment sur celle du mélange final.

	10	20	30	40	50	60
0	5	8	11	14	17	20
10	11	14	17	20	23	26
20	17	23	26	29	32	34

On constate que si l'on parvient à garder la température des granulats à 10 °C minimum, il est aisé d'avoir une température béton frais supérieure à 10 °C.

Mesures à prendre au chantier par temps froid

Les bétonnages par basses températures extérieures imposent au chantier certaines mesures de précaution :

- Ne jamais bétonner sur un sol gelé ni contre du béton gelé.
- Le béton préchauffé doit être mis en place rapidement dans un coffrage exempt de glace et de neige. Il doit être immédiatement compacté.
- Il est conseillé de ménager quelques réservations cylindriques dans le béton, par exemple au moyen de barres de fer. Elles permettront par la suite de mesurer l'évolution de la température interne du béton (fig. 2.12.3).
- Immédiatement après sa mise en place, le béton doit être protégé contre toute déperdition de chaleur. On récupère ainsi la chaleur produite par l'hydratation du ciment. Une protection au moyen de nattes isolantes ou de bâches thermiques est recommandée.
- Si ces nattes ne peuvent être appliquées directement sur la surface du béton, il faut prévoir en plus une protection contre les courants d'air.
- Pendant toute la période du durcissement, le béton ne doit pas seulement être à l'abri des déperditions de chaleur, mais également à l'abri de la dessiccation. En effet, par temps froid, l'humidité relative de l'air est généralement très basse et favorise l'évaporation de l'eau contenue dans le béton.
- Si, pendant le durcissement, la température du béton s'abaisse au-dessous du point de congélation, il faut prolonger le délai de décoffrage et de cure au minimum du nombre de jours pendant lesquels il a gelé.



Fig. 2.12.3

Mesure de la température du béton frais

Causes et prévention des altérations du béton

Ségrégation

Les diverses formes de ségrégation

La ségrégation est une séparation des constituants du béton frais qui peut se produire chaque fois que celui-ci est transporté ou mis en mouvement (transbordements, mise en place, compactage) ou simplement sous l'effet gravitaire quand le béton est en repos.

La ségrégation a toujours des conséquences importantes sur l'aspect du béton et le plus souvent aussi sur la qualité. Elle peut résulter d'une séparation entre :

- les différentes fractions granulaires
- les granulats et la pâte de ciment
- les fines et l'eau de gâchage

Parmi les formes les plus courantes de ségrégation, il faut mentionner :

- les «nids de gravier» : concentrations locales de gros granulats (fig. 3.1.1)
- les «remontées d'eau» : eau séparée ou excédentaire remontant le long des faces verticales lors du compactage
- le «ressuage» : accumulation d'un excédent d'eau sur les surfaces plus ou moins horizontales du béton. Il en résulte des surfaces irrégulières, farineuses ou poreuses
- les micro-ségrégations (ciment/fines) sont souvent plus gênantes pour l'œil que pour la qualité

Les causes

Les causes principales des divers types de ségrégation sont les suivantes :

- Consistance trop fluide du béton frais
- Dosage excessif du plastifiant ou du superplastifiant
- Mise en place incorrecte du béton (vibration exagérée, absence de tube pour des hauteurs de chute élevées, déversement du béton contre un coffrage vertical)
- Formulation inadéquate du béton (mauvaise recomposition des fractions granulaires, dosage en ciment insuffisant, dosage en eau excessif)
- Grain maximum de trop grand diamètre par rapport aux dimensions de l'élément bétonné
- Temps de malaxage trop court
- Mauvaise étanchéité des joints de coffrage, pertes de laitance (effet de filtre)
- Armature trop dense (effet de tamis)
- Enrobage insuffisant des armatures



Fig. 3.1.1
Nid de graviers dû à une hauteur de chute trop grande et/ou à une armature trop dense

Fissuration et retrait

Le béton est un matériau relativement fragile pour lequel il est très difficile d'éviter l'apparition de fissures. Sa résistance à la traction est en effet très faible en comparaison de celle à la compression. Par prudence, les normes imposent dans la plupart des cas aux ingénieurs de ne pas en tenir compte pour le dimensionnement des ouvrages en béton. L'apparition de fissures est ainsi inéluctable dès que les sollicitations de traction dans le béton atteignent ou dépassent la valeur de sa résistance à la traction, qui est de l'ordre de 2 à 3 N/mm² pour les bétons courants. Ces sollicitations et le risque de fissuration qui en découle peuvent avoir pour origine l'un ou plusieurs des facteurs suivants :

- le retrait du béton
- le tassement des fondations
- les variations de température
- les charges (poids propre, trafic, etc.)
- le gel
- des réactions chimiques (corrosion de l'armature, réactions alcalis-silice, attaque sulfatique,...).

La fissuration est rarement préjudiciable pour la stabilité d'un ouvrage, lorsqu'elle est maintenue à un niveau acceptable grâce à des mesures appropriées.
Néanmoins, outre l'atteinte portée à l'aspect de parements en béton, l'apparition de fissures peut cependant s'avérer préjudiciable pour la durabilité de l'ouvrage dans la mesure où elles constituent des canaux privilégiés pour la pénétration de substances agressives susceptibles de détériorer le béton et les armatures.

Grâce à certaines mesures, il est possible de réduire fortement – voire même dans certains cas d'empêcher – le risque et l'ampleur de la fissuration. Pour y parvenir, les séries de mesures suivantes sont plus ou moins efficaces, en fonction de l'origine des fissures :

- la conception, le dimensionnement et les dispositions constructives de l'ouvrage.
- le choix des étapes de construction et de bétonnage.
- la composition et la cure du béton.

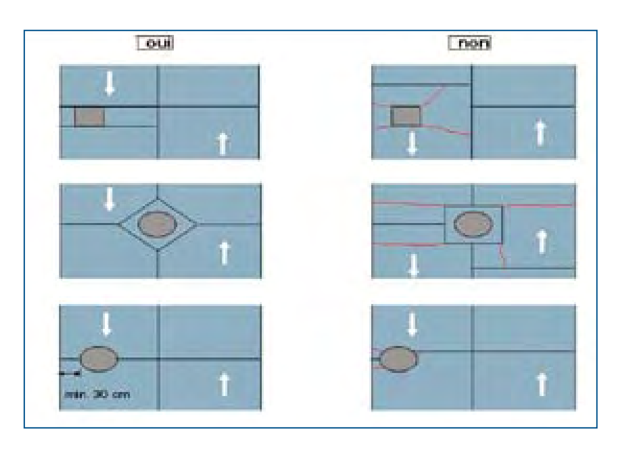


Fig. 3.2.1
Le mauvais positionnement du joint a provoqué la fissure

Conception, dimensionnement et dispositions constructives de l'ouvrage

Le choix du système statique, du nombre et de l'emplacement des joints influence fortement le niveau des contraintes de traction générées dans le béton par le retrait, le fluage ou les déformations consécutives au chargement des éléments.
La mise en œuvre d'une précontrainte peut empêcher la fissuration, en raison des contraintes de compression qu'elle génère dans le béton et qui s'opposent aux sollicitations de traction et à la fissuration.
La présence d'une armature passive (armature minimale selon les normes) n'empêche en aucun cas l'apparition des fissures, elle permet uniquement de limiter leur ouverture à une valeur acceptable et modulable en fonction de la quantité d'armature mise en place.

L'apparition de fissures dans un ouvrage en béton résulte aussi parfois de certains choix peu judicieux, voire erronés, concernant la conception, le dimensionnement ou les dispositions constructives, par exemple :

- capacité portante insuffisante,
- répartition inadéquate des armatures,
- mauvaise disposition ou absence de joints (fig 3.2.1),
- apparition de sollicitations imprévues ou excessives dues au choix des appuis du système porteur, au tassement différentiel des fondations ou à des mouvements du sol.

Fissuration et retrait

5	4	6
2	7	3
8	1	9

a)

5	6
3	4
1	2

b)

Fig. 3.2.2
Etapes de bétonnage d'un radier (en plan)
a) solution défavorable : risque de fissuration élevé
b) solution favorable : faible risque de fissuration

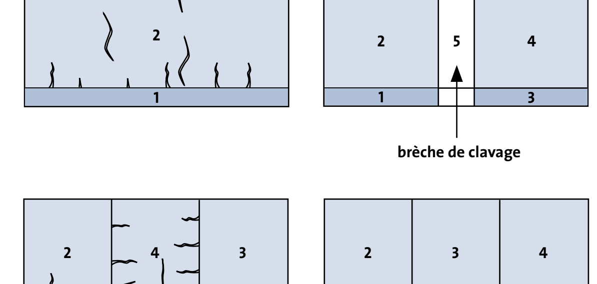


Fig. 3.2.3
Etapes de bétonnage d'un mur de soutènement (élévation)
a) solutions défavorables : risque de fissuration élevé
b) solutions favorables : faible risque de fissuration

Etapes de construction et de bétonnage

Le choix des étapes de construction et de bétonnage joue également un certain rôle en ce qui concerne le risque de fissuration.
Le retrait du béton au cours de son durcissement ne se fait pas de façon linéaire. Important à jeune âge, il diminue au cours du temps. Il est donc préférable que les différentes étapes de bétonnage d'une pièce en béton se fassent sans interruption afin de réduire le plus possible les effets néfastes du retrait différentiel entre étapes. (fig. 3.2.2 et 3.2.3 bas)

Dans les grands ouvrages, le risque de fissuration peut aussi être considérablement réduit en créant des « brèches de clavage », à savoir des joints provisoires de retrait, laissés ouverts si possible durant quelques mois et bétonnés ultérieurement. (fig. 3.2.3 haut et 3.2.4)



Fig. 3.2.4
Brèches de clavages coulées ultérieurement lors de la réalisation d'une dalle

Composition et cure du béton

Les choix relatifs à la composition du béton et aux mesures de cure sont déterminants pour l'intensité des déformations de retrait et le risque de fissuration qui en découle. Les différents types de retrait et les mesures préventives correspondantes sont traités ci-après.

Types de retrait

Il est important de faire la distinction entre les différents types de retrait et leurs conséquences (types de fissures et délai d'apparition), afin de pouvoir prendre les mesures préventives les plus appropriées dans chaque cas. (fig. 3.2.5)

Type de retrait	**Risque de fissuration**		**Utilité / Efficacité de diverses mesures**		
	Délai d'apparition	Type de fissures	Composition du béton	Cure	Armature
Retrait plastique [1]	Avant ou pendant la prise	Superficielles	Faible	Très élevée	Nulle
Retrait thermique	10h à une semaine après bétonnage	Superficielles à traversantes	Elevée	Très élevée	Moyenne
Retrait de dessiccation [2]					
• à court terme, en cas de cure insuffisante	Quelques jours à quelques semaines après bétonnage	Superficielles à traversantes	Très élevée	Très élevée	Moyenne
• à long terme, en cas de cure adéquate	Quelques mois à quelques années après bétonnage	Traversantes	Elevée	Très élevée	Elevée

1) évaporation de l'eau du béton frais (synonymes : retrait précoce ou retrait capillaire)
2) départ de l'eau du béton durci (par évaporation et/ou par « consommation » endogène)

Fig. 3.2.5
Risque de fissuration en fonction du type de retrait

Fissuration et retrait

Retrait plastique

Le retrait plastique, dénommé parfois aussi retrait précoce ou retrait capillaire (parce qu'il se produit avant la fin de la prise du ciment) est dû à une déperdition rapide de l'eau, aussitôt après la mise en place du béton. Cette perte d'eau est imputable à une évaporation excessive ou à une forte absorption par les coffrages et le fond. Il en résulte un retrait notable dans les couches où la perte est importante, alors que le reste du béton est peu affecté. Des tensions internes se développent alors entre les couches soumises à ces retraits différents. Si ces tensions dépassent la résistance du béton à la traction (faible au début, par définition), elles produisent des fissures de quelques centimètres de profondeur et en général non traversantes, qui peuvent mesurer jusqu'à 1 mm d'ouverture, voire davantage. Les éléments horizontaux (radiers, dalles et dallages) sont les plus menacés par le retrait plastique. (fig. 3.2.6)

Le risque inhérent au retrait plastique est d'autant plus grand que le béton présente des performances élevées grâce au choix d'un rapport E/C faible. Plus la quantité d'eau est faible, plus le béton est sensible à une dessiccation précoce.

Outre l'altération esthétique du béton qu'elles constituent, ces fissures peuvent aussi être à l'origine d'une désagrégation du béton, en cas d'infiltration d'eau suivie de gel par exemple. De plus, la déperdition d'eau peut empêcher une bonne hydratation du ciment. La surface du béton présentera alors une perte de résistance et une porosité élevée. Dans un environnement défavorable, ce béton aura un comportement insatisfaisant : infiltrations d'eau, descellement des gros granulats, aspect farineux et éclats en surface.



Fig. 3.2.6

Fissures de retrait plastique sur une dalle, dues à l'absence de cure

Mesures préventives

Les mesures suivantes permettent d'éviter une fissuration précoce due au retrait plastique :

- Mettre en œuvre rapidement les mesures de cure décrites au chap. 2.9 afin de limiter au maximum l'évaporation.
- Empêcher l'absorption d'eau par les coffrages ou le fond en les saturant au préalable.
- Eviter, dans la mesure du possible, les travaux de bétonnage lors de conditions météorologiques défavorables (températures très élevées et vent important), sinon appliquer les recommandations données au chapitre 2.11.
- Ajouter des fibres de polypropylène (cf. chap 1.5 « Fibres »).

Retrait de dessiccation

Pour la plupart des bétons courants, le retrait de dessiccation ou retrait hydrique résulte dans une large mesure du lent séchage du béton et, dans une moindre mesure, de la diminution de volume engendrée par la combinaison chimique de l'eau et du ciment (retrait endogène).

Pour simplifier, on désigne couramment par retrait de dessiccation la diminution de volume du béton que l'on observe au fur et à mesure de son séchage dans le temps. Plus la quantité d'eau non liée s'évapore rapidement, plus le retrait du béton est élevé. Ce processus de séchage et le retrait qui en résulte sont d'autant plus importants que l'humidité du milieu environnant est faible. Enfin, le retrait est d'autant plus élevé et rapide que l'excès d'eau non liée est important (E/C élevé), car la porosité et perméabilité du béton augmentent, ce qui accélère encore le phénomène de séchage.

La valeur finale du retrait de dessiccation se situe généralement entre 0,3 et 0,8 mm/m. Cette valeur dépend essentiellement de la quantité d'eau contenue dans la recette de béton. Toute augmentation du dosage en eau entraîne une augmentation de la valeur du retrait.

Mesures préventives

Les mesures suivantes permettent d'éviter la fissuration due au retrait de dessiccation :

- Choisir une granularité continue appropriée, de manière à minimiser la porosité du mélange pour béton et à réduire le plus possible sa demande en eau.
- Réduire à un niveau optimal le rapport E/C au moyen superplastifiant (en règle générale $0{,}40 \leq E/C \leq 0{,}50$).
- Prévoir des joints de retrait (fig 3.2.7)
- Choisir judicieusement les étapes de bétonnage (fig. 3.2.2 et 3.2.3).
- Appliquer les mesures et les durées de cure recommandées au chapitre 2.9.
- Prévoir une armature minimale suffisante et/ou des fibres métalliques, de manière à répartir la fissuration (l'apparition de multiples micro-fissures est souvent moins préjudiciable que l'apparition de fissures moins nombreuses et largement ouvertes).



Fig. 3.2.7
L'absence de joints dans les glissières new jersey provoque des fissures régulières dues au retrait de dessiccation

Fissuration et retrait



Fig. 3.2.8 et 3.2.9
Le retrait thermique a été empêché par la semelle, ceci provoque des fissurations dans les voiles



Retrait thermique

La chaleur dégagée par le ciment en s'hydratant est à l'origine de gradients de température. Ces gradients peuvent encore être accentués par l'hydratation accélérée à température plus élevée.

Après la nette élévation de température qui accompagne la prise, le béton au jeune âge se refroidit au contact de l'air et, de même que la plupart des matériaux, il diminue de volume quand sa température s'abaisse. Comme le béton refroidit naturellement plus vite en surface qu'en profondeur, des tensions internes peuvent naître entre la zone interne qui se contracte moins et la zone externe qui se contracte plus. Ces tensions peuvent provoquer des fissures superficielles.

D'autre part, comme pour le retrait hydrique, si le béton n'est pas libre de se raccourcir, le retrait dû au lent refroidissement général peut occasionner une fissuration profonde plus ou moins importante (fg 3.2.8. et 3.2.9)

Mesures préventives

Les mesures suivantes permettent d'éviter la fissuration due au retrait thermique :

- Utiliser un ciment ayant une chaleur d'hydratation modérée.
- Décoffrer le plus tard possible. Eviter de décoffrer lorsque la température du béton est maximale afin de limiter l'ampleur du choc thermique lors du décoffrage (brusque refroidissement du béton à la surface).
- Choisir judicieusement les étapes du bétonnage (fig. 3.2.2 et 3.2.3).

Carbonatation et corrosion des armatures

Qu'est-ce que la carbonatation ?

On appelle carbonatation la réaction chimique entre le gaz carbonique (CO_2) contenu dans l'air et l'hydroxyde de calcium ($Ca[OH]_2$) contenu dans la pâte de ciment.
La carbonatation commence à la surface du béton et se propage lentement en profondeur. Son influence sur le béton lui-même est favorable car elle le rend plus compact et augmente sa résistance mécanique et sa durabilité. Elle agit à la manière d'une protection naturelle contre la pénétration des gaz et des liquides. Le béton non armé profite pleinement de l'influence favorable de la carbonatation.

Effet de la carbonatation sur le béton armé

En revanche, cette même carbonatation peut être à l'origine d'importants dommages sur les structures en béton armé. En effet, grâce à l'alcalinité élevée que lui confère le ciment (pH > 12), le béton protège l'acier de la corrosion. Or la carbonatation diminue cette alcalinité (pH < 9) et, dès que le «front de carbonatation» atteint la zone de l'armature, celle-ci peut commencer à s'oxyder (fig. 3.3.2). Comme la formation de rouille s'accompagne toujours d'une augmentation de volume, il en résulte généralement un éclatement du béton d'enrobage (fig. 3.3.1). Dès lors, les barres d'armature ne disposent plus d'aucune protection et le béton armé commence à perdre de sa capacité portante.



Fig. 3.3.1
La corrosion des armatures a conduit à une augmentation de volume des armatures et donc à une fissuration et un éclatement du béton



Fig. 3.3.2
Mise en évidence du front de carbonatation par un test à la phénolphtaléine sur une carotte issue d'un voile en béton. Le béton carbonaté reste gris alors que le béton non carbonaté, en partie centrale, très alcalin, fait virer cet indicateur au rouge

Carbonatation et corrosion des armatures

Vitesse de carbonatation

La vitesse à laquelle le front de carbonatation pénètre à l'intérieur du béton est d'autant plus grande que le béton est poreux. Elle ralentit cependant progressivement au cours du temps, car la couche déjà carbonatée freine les échanges avec l'extérieur (fig. 3.3.3). La vitesse et la profondeur de carbonatation sont toutefois influencées par quantité d'autres facteurs comme la teneur en ciment, les variations de température ainsi que la fréquence des alternances entre l'état sec et l'état mouillé à la surface du béton.

Mesures préventives

Il ne faut jamais perdre de vue que la carbonatation commence après la prise, dès le décoffrage.
Le but à atteindre est que le front de carbonatation n'atteigne jamais la profondeur des armatures. Pour ce faire, il faut :

- Recouvrir les armatures d'un enrobage de béton suffisant, en général l'épaisseur de béton se situe entre 2,5 à 4 cm pour le bâtiment. L'Eurocode 2, calcul des structures en béton NBN EN 1992-1-1 § 4.4.1., donne un calcul de l'enrobage d'armature en fonction de la classe d'exposition. Une attention particulière doit être vouée aux armatures situées derrière les rainures et les faux joints.
- Respecter les spécifications de la norme NBN EN 206-1 en matière de composition de béton.
- Pratiquer une bonne cure afin que la surface du béton soit bien hydratée dès le tout jeune âge et que la vitesse de carbonatation soit freinée aussitôt que possible.

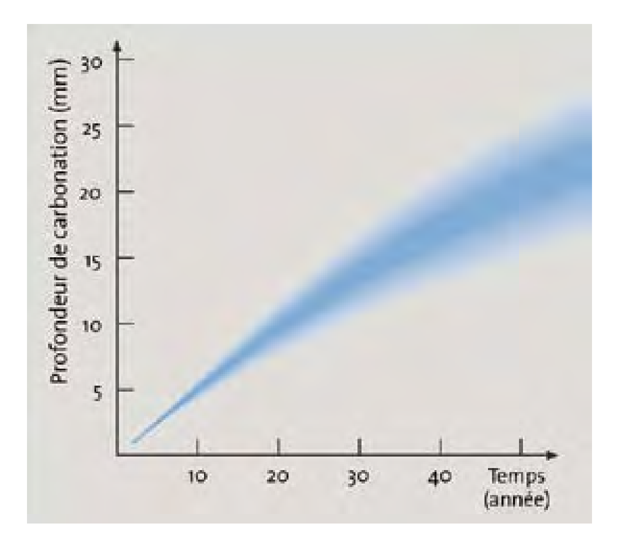


Fig. 3.3.3

Le rapport entre l'âge du béton et la profondeur de carbonatation est empreint d'une forte dispersion, due aux nombreux paramètres qui influent sur la vitesse de carbonatation

Qu'entend-on par efflorescences ?

Les efflorescences sont des taches généralement blanches qui apparaissent à la surface du béton. Elles sont dues aux substances dissoutes dans l'eau lors du malaxage ou produites par l'hydratation du ciment, et qui se déposent en surface aux endroits où l'eau s'évapore au fur et à mesure du séchage du béton.

Nous pouvons distinguer les efflorescences primaires et les efflorescences secondaires :

- les efflorescences primaires surviennent lors de la prise du béton avant que celui-ci n'ait été exposé aux intempéries,
- les efflorescences secondaires surviennent après la prise du béton, soit en conséquence de l'exposition à la pluie soit suite à l'achèvement de la prise du ciment (parfois deux ans après le début de la prise).

Effet des efflorescences

Les efflorescences n'ont aucune influence sur les caractéristiques mécaniques des éléments : pas de diminution de la résistance mécanique, de la résistance à l'usure, de la résistance au cycle gel dégel et aux sels de déverglaçage,...

Si les efflorescences nuisent dans un premier temps à la qualité esthétique du béton, elles disparaissent cependant complètement quelques années après la mise en oeuvre des éléments en béton.

Efflorescences de chaux

Les efflorescences les plus répandues sont dues à l'hydroxyde de calcium (ou hydrate de chaux) libéré lors de l'hydratation du ciment.

En s'évaporant de la surface du béton, l'eau de gâchage laisse un résidu d'hydroxyde de chaux que le gaz carbonique de l'air va rapidement transformer en carbonate de calcium insoluble. La répétition des alternances entre l'état sec et l'état mouillé à la surface du béton peut rendre ce dépôt assez épais pour être visible sous forme d'une tache blanche (fig 3.4.3).

Quand se forment les efflorescences dues à la chaux ?

Les conditions atmosphériques auxquelles le béton est soumis jouent un rôle important. Un environnement alternativement sec et humide du béton au jeune âge constitue une condition favorable à l'apparition d'efflorescences de chaux. Elles se forment généralement surtout par temps froid et humide (fin de l'automne, début du printemps) (fig 3.4.1). La pluie, la neige, le brouillard et la rosée favorisent leur apparition.



Fig. 3.4.1
Efflorescence sur une poutre en béton



Au niveau de la formulation béton, les facteurs suivants jouent également un rôle déclenchant :

- Porosité élevée du béton : l'eau peut circuler facilement dans la masse
- Excès d'eau de gâchage

Efflorescences

Elimination des efflorescences

Les dépôts de carbonate de calcium disparaissent normalement dans le temps sous l'effet de la pluie.

Le nettoyage peut être accéléré en traitant la surface à l'aide par exemple d'une solution d'acide chlorhydrique (de maximum 3 %). Il est conseillé d'immerger tout d'abord le béton dans l'eau afin que l'acide n'y pénètre pas trop et n'agisse qu'en surface. Après réaction, il faut rincer abondamment à l'eau, afin d'éviter une action ultérieure de l'acide sur le béton lui-même.



Fig. 3.4.2

Efflorescences sur un mur en béton soumis à la pluie après décoffrage



Fig. 3.4.3

Efflorescences sur blocs bétons soumis à une alternance sec-humide

Mesures préventives

Il est difficile d'éviter totalement le risque d'efflorescences sur des éléments d'ouvrage qui seront obligatoirement exposés aux intempéries.

On peut tout de même abaisser ce risque à un minimum en appliquant les mesures suivantes :

- Diminuer la quantité d'eau de gâchage (utiliser des fluidifiants) en vue d'obtenir un béton compact, le moins poreux possible.
- Abriter le béton au jeune âge de la pluie et de l'ensoleillement direct. Cette mesure est essentielle pour le couronnement de murs exposés aux intempéries (fig. 3.4.2).
- Eviter l'eau de condensation et faire en sorte que toutes les surfaces de béton soient exposées à l'air. Ne pas empiler par exemple des produits ou éléments préfabriqués en béton directement les uns sur les autres.
- Utiliser des ciments aux ajouts (laitier, cendre volante,...) qui produisent moins de chaux lors de leur hydratation.
- L'utilisation d'enduits ou de peintures de protection est possible, mais doit inévitablement passer par le conseil d'un spécialiste.

L'apparition d'efflorescences est un phénomène qui dépend de très nombreux facteurs, difficiles à maîtriser, voire incontrôlables, car souvent liés au microclimat local. Il faut en conséquence adapter de cas en cas les mesures préconisées et, au besoin, faire des essais afin de définir la méthode la plus efficace.

Action du gel et des sels de déverglaçage

Action du gel

La dégradation du béton par les cycles de gel et de dégel est due essentiellement à la transformation en glace de l'eau contenue dans les granulats ou dans les capillaires de la pâte de ciment. La formation de la glace implique une augmentation de volume d'environ 10 %. Cette expansion, associée au mouvement de l'eau qui n'a pas encore gelé dans les capillaires du béton, va engendrer des pressions hydrauliques internes importantes, dépassant la capacité de résistance à la traction du béton. Il en résulte certains dommages : la répétition fréquente des cycles de gel - dégel fait apparaître un réseau très dense de microfissures dans la zone superficielle du béton. Ce réseau évolue plus ou moins rapidement vers un feuilletage ou un écaillage de la surface (fig. 3.5.1).

Les chutes de la température du béton au-dessous du point de congélation de l'eau sont d'autant plus dangereuses qu'elles sont rapides et fréquentes. Il faut toutefois relever que les surfaces verticales sont peu exposées à ce genre de dégâts.

Action des sels de déverglacage

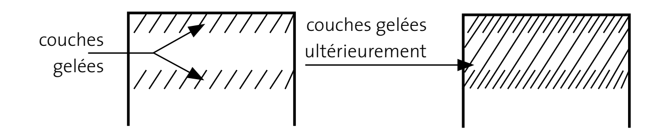
Les dommages causés au béton par les sels de déverglacage (appelés aussi fondants) peuvent avoir plusieurs origines :

- Saturation en eau de la surface : les fondants font fondre la neige ou la glace. Une couche d'eau est donc maintenue à la surface et sature le béton. On n'a plus de « vases d'expansions » s'opposant au gonflement lorsque l'eau gèle à nouveau.

- Choc thermique que ces agents provoquent dans les couches superficielles du matériau : les fondants puisent dans le béton la chaleur nécessaire à faire fondre la neige et la glace qui le recouvrent. Ils provoquent ainsi une brusque chute de la température superficielle du béton, chute qui génère de fortes tensions entre la couche de surface et les couches inférieures dont la température n'a pas varié. Il peut en résulter très rapidement des éclats ou un écaillage de la surface (fig 3.5.2).

- Pression osmotique : l'eau qui gèle dans le béton est en réalité une solution saline. Au cours du gel, il se produit une séparation en glace, moins concentrée en sel qu'au départ, d'une part et en solution saline d'autre part, qui est donc devenue plus concentrée en sels. La couche non gelée directement en contact avec une couche gelée est donc plus concentrée en sels que celles qui sont plus éloignées. Il s'établit donc un flux pour rééquilibrer ces concentrations en sels. Ce flux engendre une pression dans le matériau qui peut mener à une fissuration ou écaillage, suivant la profondeur à laquelle ces pressions prennent place.

- Gel par couches : à une température donnée, les couches supérieures et inférieures gèlent sous l'action du froid. La couche intermédiaire, où se trouve la concentration maximale en chlorure ne gèle pas. Si suite à un abaissement supplémentaire de température l'eau de cette couche vient à geler, elle ne trouve pas d'espace d'expansion et repousse la couche supérieure.



L'effet destructeur des sels de déverglaçage est beaucoup plus redoutable que l'action du gel seul, mais il est aussi plus limité : seules les surfaces soumises directement à l'épandage de sel sont menacées.



Fig. 3.5.1
La partie basse de ce mur en béton est lavée quotidiennement à l'eau. Le gel a provoqué les éclatements du béton de surface



Fig. 3.5.2
Ecaillage d'une glissière de sécurité en béton armé

Action du gel et des sels de déverglaçage

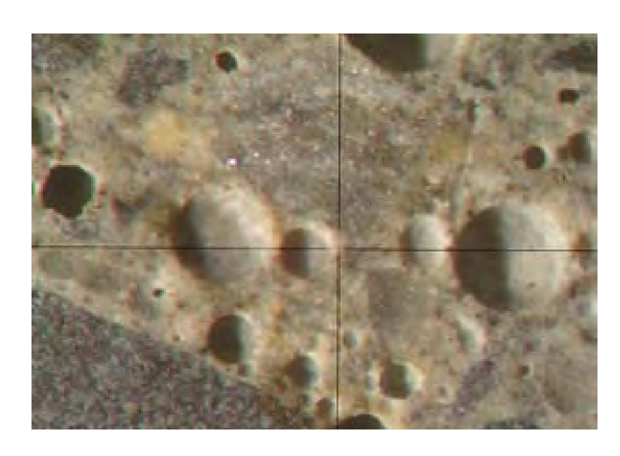


Fig. 3.5.3
Bonne répartition des microbulles dans un béton à air entraîné. Grossissement 100x, la fenêtre représente 750µm

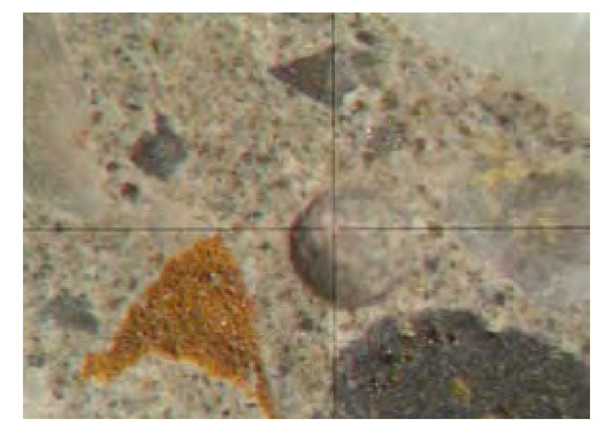


Fig. 3.5.4
Mauvaise répartition des microbulles dans un béton à air entraîné. Grossissement 100x, la fenêtre représente 750µm

Pénétration des chlorures

Les sels de déverglaçage utilisés comme fondants sont généralement des chlorures de calcium ou de sodium. Dissous dans la glace ou la neige fondue, ces chlorures pénètrent alors plus ou moins profondément dans le béton, en fonction de sa porosité. Dès que les chlorures atteignent les armatures, parfois seulement très localement (par ex. au droit d'une fissure), ils constituent un grave risque de corrosion par piqûres induite par les chlorures. Pour éviter ce type de corrosion, il faudrait utiliser des agents de déverglaçage sans chlorure, plus coûteux (p. ex. à base de glycol ou d'urée).

Action de l'air entraîné

Lors du gel du béton, le paramètre important est la distance que doit parcourir l'eau sous pression.
Le fait d'introduire de minuscules bulles d'air permet de diminuer cette distance que doit parcourir l'eau pour trouver un refuge où elle peut geler et gonfler sans contrainte.
Dans ce but, on introduit, lors du malaxage, des adjuvants entraîneurs d'air.
L'efficacité d'un adjuvant entraîneur d'air peut s'apprécier par sa capacité à former beaucoup de petites bulles, pour un volume d'air donné.

Le réseau de bulles d'air est caractérisé par le paramètre « L barre »: c'est la demi-distance moyenne existant entre deux bulles d'air. Plus l'environnement sera agressif (plus il fera froid longtemps et rapidement), plus le L barre devra être petit. Une valeur de l'ordre de 250 µm permet au béton de résister à la plupart des environnements froids d 'Europe occidentale.
La caractérisation du réseau de bulles d'air est réalisée sur le béton durci (fig 3.5.3 et 3.5.4).

En revanche, l'augmentation de la teneur en air entraîne une certaine diminution de la résistance du béton : + 1% d'air entraîné => - 5% des Rc à 28 jours.

Cet effet négatif peut être compensé par l'utilisation d'un ciment de classe de résistance plus élevée ou la diminution du rapport E/C. En effet, 1 % d'air entraîné dans le béton permet une diminution d'eau de gâchage d'environ 5 litres par m³, tout en conservant l'ouvrabilité.

D'une manière générale, la production et la mise en œuvre de bétons à air entraîné requièrent une attention très particulière sur les points suivants :

- consistance du béton
- durée et intensité du malaxage
- température
- moyens de mise en place
- méthode et durée de compactage

Action du gel et des sels de déverglaçage

En outre, l'aptitude à l'emploi d'un béton à air entraîné doit être établie au moyen d'essais préalables et contrôlée en cours d'exécution.

Les essais préalables se font généralement sur béton frais (mesure de la teneur en air au moyen d'un aéromètre) et sur béton durci (mesure du diamètre des bulles d'air et de leur espacement). Ces dernières mesures se font sur des lames minces de béton analysées au microscope.
En cours d'exécution, on contrôle régulièrement la teneur en air du béton à l'aéromètre.

Composition des bétons soumis aux attaques du gel et des sels de déverglaçage

Mesures préventives
Le principe de base pour formuler un béton résistant au gel est le suivant : Il faut une bonne résistance mécanique, empêcher l'eau de rentrer et avoir un réseau bien distribué de bulles d'air. En pratique, cela se traduit par :

- Dosage élevé en ciment
- Compacité => Bonne cure et E/C faible
- Air entraîné

En outre, afin d'avoir un béton résistant au sel de déverglaçage , il faut particulièrement soigner la peau du béton, qui sera attaquée en premier par l'action des sels. Soit :

- Soin particulier de la cure du béton
- Eviter le ressuage et la remontée de laitance.

Enfin, il faut bien entendu veiller à la non gélivité des granulats.

Au niveau de la mise en oeuvre, les surfaces non coffrées doivent être talochées suffisamment pour bien fermer la peau du béton mais pas trop, ceci afin d'éviter la remontée de laitance et la destruction du réseau de bulles là où il est le plus nécessaire.

Composition des bétons
Les exigences minimales relatives à la composition des bétons sont fixées dans la norme NBN EN 206-1 (classes d'environnement EE2, EE3 ou EE4; en milieu marin ES2 ou ES4).

En outre, les CCT des ministères régionaux des routes (CCT RW 99 et SB 250) donnent pour les bétons routiers des exigences supplémentaires de composition et définissent des caractéristiques minimales à atteindre sur béton durci, notamment en terme d'absorption d'eau et d'écaillage.

La résistance au gel des bétons est vérifiée par un essai d'absorption d'eau (NBN B15-215), un essai de gel (NBN B15-231) et de gel en présence de sel par un essai d'écaillage (ISO/DIS 4846.2).

Attaque par les sulfates

L'attaque par les sulfates d'origine externe

Les eaux sulfatées (ou eaux séléniteuses) constituent un agent agressif pour le béton durci. En se combinant avec l'aluminate tricalcique de la pâte de ciment durcie, les sulfates dissous dans l'eau donnent naissance à des composés expansifs, l'ettringite (ou sel de Candlot).

Domaines de risque et dommages dus aux sulfates d'origine externe

La présence dans le sous-sol de minéraux sulfatés comme le gypse et l'anhydrite (sulfates de calcium) constitue le principal facteur de risque dont il faut tenir compte, même dans le cas d'une présence éloignée. En effet les eaux souterraines peuvent dissoudre et transporter très loin des sulfates en solution. L'agression par les sulfates menace donc avant tout les ouvrages ou parties d'ouvrages enterrés.

En surface, les canalisations d'eaux usées ménagères et/ou industrielles peuvent également être menacées lorsqu'elles transportent des sulfates en solution.

Sous l'effet des sulfates, l'altération du béton se manifeste par un gonflement, accompagné d'une fissuration importante (fig. 3.6.1). L'action des sulfates est toutefois relativement lente, les constructions provisoires ne nécessitent donc aucune mesure particulière.

Mesures préventives

Lorsqu'il est établi ou prévisible que des éléments en béton seront en contact avec des sulfates dissous dans l'eau ou simplement présents dans le sol, il est nécessaire de prendre les précautions suivantes :

- Ne mettre en œuvre que des bétons très compacts, donc à faible porosité.
- Limiter le rapport E/C à des valeurs inférieures à 0,50.
- Tenir compte du fait que la capillarité peut faire remonter les eaux séléniteuses assez haut dans les structures.
- Si le béton doit être en contact avec des eaux souterraines contenant plus de 500 mg/l de sulfates ou avec des couches de terrain en contenant plus de 3000 mg/kg (environnement EA2 ou EA3), il faut utiliser un ciment à résistance élevée aux sulfates (HSR) conforme à la norme NBN B12-108.

On peut alors choisir entre :

- Les ciments CEM I HSR
- Les ciments à base de laitier CEM III/B ou CEM III/C HSR qui contiennent plus de 65% de laitier.
- Les ciments CEM V/A HSR
- Les ciments sursulfatés



Fig. 3.6.1

Gonflement important d'une galette de pâte de ciment soumis à un test de résistance aux sulfates. Le bâtonnet blanc indique la longueur initiale

Formation d'éttringite différée

La formation d'éttringite différée, appelée également DEF (Delayed Ettringite Formation) est une réaction pouvant se produire dans certaines conditions entre du sulfate contenu dans le béton et les aluminates. La présence d'eau est nécessaire à la réaction.

Ce phénomène est rarement rencontré car il nécessite la conjonction de plusieurs paramètres (température élevée de durcissement, composition du ciment, présence d'eau à la surface du béton)

Ces sulfates en excès proviennent principalement de la décomposition, à haute température, en mono-sulfoaluminate, de l'ettringite primaire (tri-sulfoaluminate), formée au cours de l'hydratation du ciment.

Après durcissement du béton, plusieurs semaines à plusieurs années, si le béton est en présence d'eau, ce sulfate en excès va se combiner avec de l'aluminate non hydraté pour reformer de l'ettringite appelée différée. L'ettringite est un composé expansif. L' ettringite primaire qui se forme durant l'hydratation du ciment a la place pour gonfler, étant donné qu'elle se développe lorsque le matériau n'est pas encore durci.

L'ettringite différée se forme lorsque le matériau est durci. Elle n'a donc pas la place de gonfler et son développement s'accompagne d'une expansion et d'une fissuration du béton (fig 3.6.2).



Fig. 3.6.2

Pile massive d'un pont atteinte de réaction sulfatique interne. Le béton a été soumis à une température de 80°C durant plus de 200 heures

Prévention

La meilleure des préventions consiste à limiter la température à cœur du béton à 65 °C lors de son durcissement.

Eu égard au fait que des températures excessives du béton en cours de durcissement peuvent notamment faire baisser les résistances à long terme, provoquer du retrait thermique et donc des risques de fissuration, cette prévention sera largement bénéfique à la qualité intrinsèque du béton.

Des dispositions constructives visant à éviter la stagnation d'eau à la surface de béton sont également un moyen de se prémunir de la formation de DEF.

Moyens pour abaisser la température du béton en cours de durcissement

De nombreux moyens existent pour diminuer la température du béton de pièces massives en cours de durcissement :

- utilisation de ciments à faible chaleur d'hydratation comme par exemple les ciments au laitier
- privilégier les coffrages non isolants
- refroidir la température de l'eau ou arroser les granulats en été
- mettre en œuvre un système de refroidissement actif (par circulation d'eau froide)
- éviter le bétonnage de pièces massives par temps chaud

Action des produits chimiques

Les deux types d'agression par les produits chimiques

Face à l'agression de produits chimiques, le béton peut soit se montrer résistant, soit se dégrader plus ou moins rapidement. Les dommages, lorsqu'il y en a, sont essentiellement de deux sortes :

L'érosion chimique

L'altération du béton par érosion chimique se produit lorsqu'il y a dissolution de l'un des composants de la pâte de ciment par un agent chimique extérieur (fig. 3.7.1 à fig. 3.7.3). Il s'ensuit un lessivage du composant dissout : le béton devient alors de plus en plus poreux et perd de la matière en même temps que son rôle protecteur de l'armature.

Ce processus commence toujours à partir de la surface de contact avec l'agent chimique et progresse (en général lentement) vers l'intérieur du béton.

Le gonflement

L'altération du béton par gonflement fait suite à la combinaison, à l'intérieur du béton, entre une substance chimique ayant pénétré depuis la surface, un constituant de la pâte de ciment, et l'eau des capillaires. Lorsque cette combinaison produit un composé solide dont le volume est supérieur à celui des constituants de départ, il en résulte des pressions internes qui peuvent provoquer un gonflement de la masse, associé à une fissuration lente, mais importante. Celle-ci peut se manifester jusqu'à une certaine distance du point de pénétration de la substance agressive.

Mesures préventives

La protection du béton contre les agressions extérieures d'origine chimique nécessite les mesures suivantes :

- Choix correct du ciment et dosage approprié
- Mise en œuvre d'un béton compact, de faible porosité, avec un rapport E/C faible < 0.50
- Enrobage suffisant des armatures
- Cure soignée du béton
- Application des textes normatifs et recommandations.

Les ciments de type CEM III peuvent être recommandés dans tous les cas où des éléments de structure doivent être protégés contre l'agression de substances chimiques (acides, sels ou sulfates).

En cas d'attaque par des sulfates en solution, les mesures ci-dessus doivent encore être associées à l'emploi d'un ciment à résistance élevée aux sulfates. A cet effet, les ciments HSR de type CEM I, CEM III, CEM V ou CSS sont particulièrement indiqués (voir également le chapitre 3.6 consacré à l'action des sulfates).

Dans le cas d'agressions très spécifiques ou de concentrations très élevées en agents agressifs (voir NBN EN 206-1), on complètera les mesures énoncées ci-dessus par l'exécution d'un revêtement de surface spécialement prévu à cet effet (à base de résines synthétiques, de céramique, etc...). En cas de doutes, l'avis d'un spécialiste sera demandé.

Exemples de bétons soumis à une attaque acide



Fig. 3.7.1
Bonne tenue

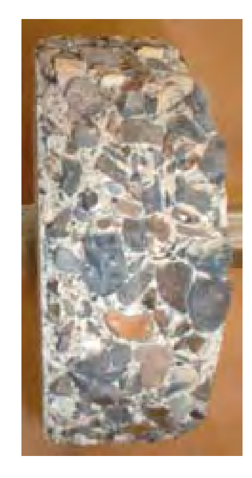


Fig. 3.7.2
Mauvaise tenue – Granulats siliceux



Fig. 3.7.3
Mauvaise tenue – Granulats calcaires

Effet de quelques substances chimiques sur le béton

La figure 3.7.4 récapitule les effets produits par diverses substances chimiques (ou naturelles) lorsqu'elles entrent en contact prolongé avec le béton.

Substance	**Comportement du béton**			**Comportement du béton armé**
	Pas d'altération	Altération par érosion chimique	Altération par gonflement	Altération par corrosion des armatures
Bases faibles	●			
Bases fortes	●			
Acides faibles		◆		■
Acides forts		◆ ◆		■
Eau de pluie Eau distillée Eau déminéralisée		◆		■
Huile, graisses		◆		
Sulfates en solution			◆	■
Chlorures en solution	●			◆
Gaz caboniques (CO_2)	●			■

Fig. 3.7.4
Effet de quelques substances sur le béton

● Pas d'altération
◆ Agression directe
■ Corrosion suite à l'altération de la surface du béton ou à sa carbonatation profonde.

Réaction alcali-silice

Réaction alcali-silice

La réaction alcali-silice est une réaction chimique à évolution lente entre certains granulats dits « potentiellement réactifs» et les alcalins solubles (ions sodium Na^+ et potassium K^+) normalement présents dans les constituants du béton (le ciment pour la plus grande part, soit environ 80 %), ou provenant du milieu environnant (eaux souterraines, sels de déverglaçage, eau de mer). Certains minéraux siliceux (quartz microcristallins, opales, calcédoines) ou silicates (feldspaths, micas) deviennent en effet «réactifs », c'est-à-dire instables, lorsqu'ils sont placés dans un milieu alcalin comme le béton (pH > 12,5). De plus, pour que la réaction puisse se développer, une humidité élevée (HR > 80%), ou la présence d'eau, constitue une condition indispensable.

La réaction alcali-silice conduit à la formation d'un gel de composition silico-calco-alcaline, à caractère hydrophile et expansif. Il est établi que le calcium joue également un rôle important dans cette réaction. Dans les bétons de ciment CEM I, la source de calcium est constituée par les cristaux de portlandite ou d'hydroxyde de calcium, abondamment présents à l'interface pâte-granulats. Le processus de formation de ce gel peut générer des pressions internes au béton, qui se traduisent par un phénomène de gonflement et l'apparition de fissures souvent accompagnées d'exsudation de gel gris sombre (à ne pas confondre avec les efflorescences de chaux !). D'autres mécanismes, telle que l'expansion volumique des minéraux siliceux des granulats soumis à l'attaque alcaline du milieu béton, peuvent entraîner le gonflement du béton. Ces fissures peuvent entraîner la destruction progressive du matériau par décohésion interne et éclatement du béton de surface, de manière un peu semblable aux effets du gel.

L'altération du béton résultant de la réaction alcali-silice est bien connue depuis les années '40 aux Etats-Unis et au Canada. Cependant depuis les années '80, plusieurs cas ont été observés en Belgique. Ce phénomène a donc été pris en considération, au même titre que n'importe quel autre risque, afin d'orienter judicieusement, d'une part, le choix de la conception de l'ouvrage et, d'autre part, le choix des constituants du béton. L' apport en alcalins de chacun des constituants (ciment, granulats, adjuvants, ajouts et eau de gâchage, en particulier s'il s'agit d'eau recyclée) est exprimé sous forme de pourcentage de Na_2O équivalent.

L'influence du rapport E/C sur la réaction alcali-silice semble par contre très controversée; il n'est en fait pas du tout prouvé que de faibles valeurs soient bénéfiques.

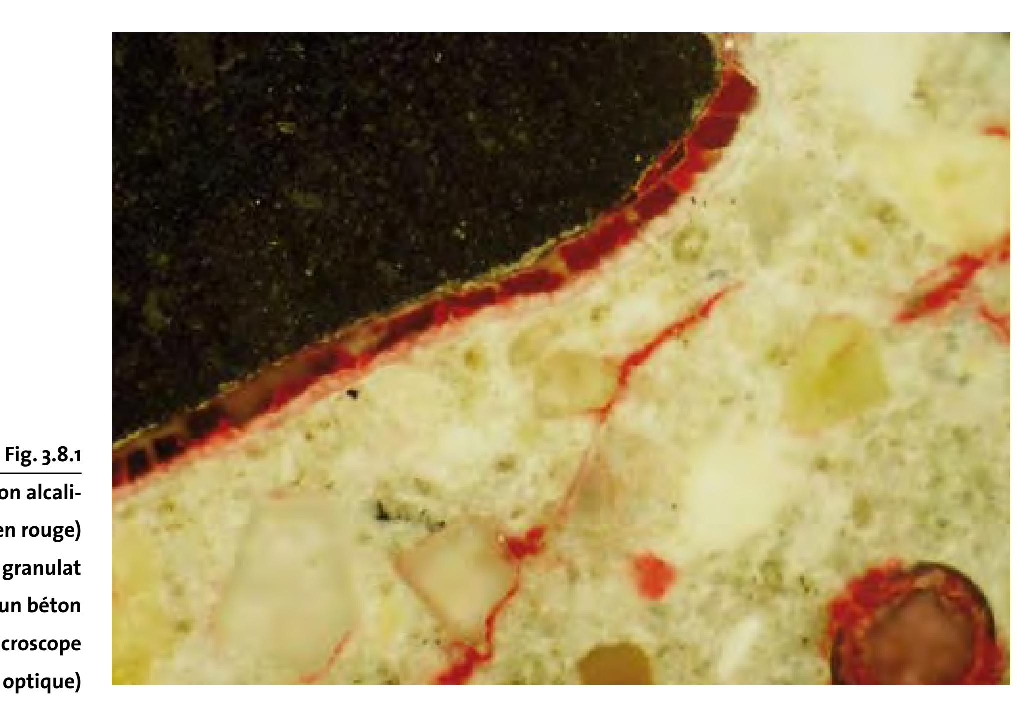


Fig. 3.8.1
Gel de réaction alcali-silice (coloré en rouge) autour d'un granulat réactif dans un béton (photo au microscope optique)

Mesures préventives

Pour prévenir la réaction alcali-silice, au moins une des mesures suivantes doit être appliquée :

- soit utiliser un ciment LA (Low Alcalis) au sens de la norme NBN B 12-109 et faire le calcul du bilan en alcalis de la formule béton. La teneur en Na_2O équivalent maximum (kg/m³) admissible dépend du type de ciment utilisé. Cette méthode est celle la plus couramment utilisée en Belgique. (fig.3.8.3).
- soit empêcher les apports d'eau extérieurs par des mesures de conception appropriées (formes d'ouvrage facilitant l'évacuation des eaux, étanchéité fiable, contrôlable et entretenue, etc.).
- soit utiliser des granulats non-réactifs.
- soit choisir une composition de béton satisfaisant à un essai de gonflement.

... et choix du ciment

Pour limiter l'action des alcalins dans le béton, il est recommandé d'utiliser des ciments de type CEM III, avec ajouts minéraux sous forme de laitier granulé de haut fourneau. Les réactions d'hydratation qui en résultent sont bénéfiques, car elles fixent des alcalins, «consomment» de la portlandite et réduisent la perméabilité du béton.

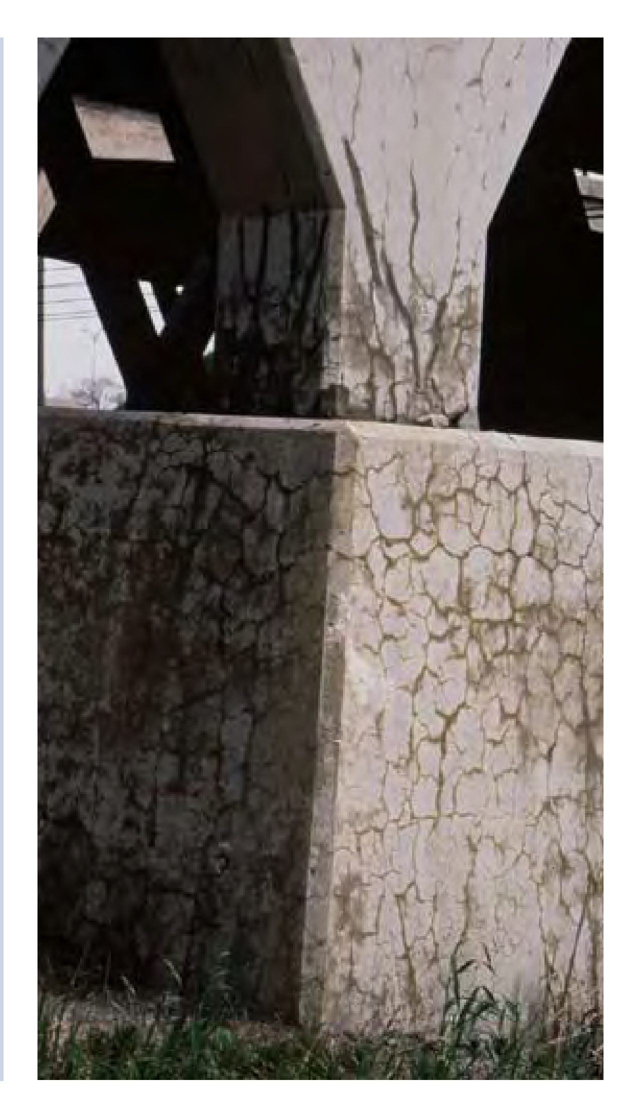


Fig. 3.8.2
Ouvrage atteint de réaction alcali-silice

Béton à base de ciment	Exigence ciment	Exigence béton
	Na_2O équivalent max. du ciment (NBN B 12-209) %	**Teneur maximale en Na_2O-équivalent du béton kg/m³**
CEM I LA	0,60	3,0
CEM III/A LA (36 à 49% de laitier)	0,90	4,5
CEM III/A LA (50 à 65% de laitier)	1,10	5,5
CEM III/B LA	1,30	6,5
CEM III/C LA	2,00	10,0
CEM V/A (S-V) LA	1,50	7,5
CSS LA	2,00	10,0

Fig. 3.8.3
Recommandations pour la prévention de réaction alcali-silice

Résistance au feu



Fig. 3.9.1
Armatures mises à nu suite à l'éclatement du béton d'enrobage lors d'un incendie, sans influence significative sur la capacité portante de la structure

Le béton face au feu

Lorsqu'il est soumis à des températures très élevées, le béton ne brûle pas, il ne dégage ni fumée ni gaz toxique. Au contraire, il s'oppose à la propagation du feu et, lorsqu'il y est exposé, sa température ne s'élève que très lentement. Le béton constitue donc une excellente barrière anti-feu sans qu'il soit besoin de le revêtir d'une protection supplémentaire. Seule une exposition intense et de longue durée permet d'observer des éclats de surface au droit des armatures (fig 3.9.1).
Le dimensionnement au feu des structures en béton est lié à leur robustesse, à la continuité et à l'enrobage des armatures et la bonne conception des assemblages.

Température critique

Avec ou sans armatures, le béton peut supporter sans dommage des températures jusqu'à 300°C. Cette température dite «critique» n'est atteinte que très lentement au contact du feu. Des essais ont montré que, lorsque la surface du béton est soumise à une flamme de 1000°C (ce qui correspond approximativement à un feu de bois intense ou à un brûleur à gaz), il faut attendre une heure pour que la température critique atteigne une profondeur de 2 cm dans le béton, et une heure de plus pour qu'elle atteigne 5 cm.



Fig. 3.9.2
Un bâtiment a été sauvé grâce au mur de béton

Mesures de protection supplémentaires pour des cas particuliers

Le béton constitue par lui-même une excellente protection contre le feu et les températures élevées. Au besoin, on peut encore améliorer cette protection en augmentant l'enrobage des armatures.
Dans les cas où le risque d'incendie, la charge thermique ou la température de service sont particulièrement élevés, des mesures supplémentaires permettent d'améliorer encore considérablement la résistance thermique du béton. Parmi ces mesures, on peut mentionner :

- L'exclusion de tout granulat carbonaté ou siliceux (le calcaire et le grès, par exemple) au profit de granulats résistant au feu, comme le basalte, l'argile expansée, la terre cuite, etc.
- L'ajout d'un stabilisateur céramique (par exemple de la poudre de tuile) dans le cas de températures de service très élevées.
- L'introduction dans le béton de fibres organiques qui seront volatilisées par les hautes températures et laisseront des micro canaux par où l'eau des pores pourra s'évaporer sans créer de surpression, évitant ainsi l'éclatement du béton d'enrobage.

Après l'incendie

Le contrôle des ouvrages touchés par le feu consiste en une inspection visuelle et une comparaison avec des cas similaires. Tout béton exposé à des températures dépassant 300°C doit être ausculté afin d'envisager le remplacement des couches dégradées.
Pour les bétons exposés à des températures inférieures à 300°c, souvent un simple nettoyage suffit.
La rapidité des réparations est un facteur important pour limiter au maximum les pertes d'activité qui suivent un incendie important.

La réparation est préférable à la démolition et la reconstruction, pour des raisons d'économie.

Bibliographie, normes et liens utiles

